

ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ КАК ПРИЧИНА ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ МЕТАЛЛОВ

В.М. Зверев, В.П. Силин

Показано, что тепловое расширение существенным образом влияет на температурную зависимость магнитной восприимчивости металлов $\chi(T)$. Проведено сравнение экспериментальных данных с теоретическими зависимостями $\chi(T)$ для парамагнитных металлов Pt, Rh, Mo и Ir.

Температурная зависимость магнитной восприимчивости металлов давно привлекает к себе внимание теоретиков (см., например, ¹). Среди имеющихся здесь теоретических подходов отметим традиционный ², в котором температурная зависимость $\sim T^2$ определяется обычным малым тепловым размытием уровня Ферми, а также новый подход ³, в котором учитываются тонкие детали фермиевского распределения электронов, что вместо закона T^2 дает более сложный.

В настоящей статье мы предлагаем подход, являющийся альтернативным подходу работы ³, когда мы усматриваем основную причину температурной зависимости магнитной восприимчивости ряда металлов в тепловом расширении. Следуя ², исходим из традиционного выражения для парамагнитной восприимчивости χ металла в магнитноупорядоченной фазе

$$\chi^{-1}(T, V, N) = \frac{1}{2\beta^2\nu} \left\{ 1 + 2\psi\nu - \frac{(\pi k T)^2}{6\nu^2} [\nu\nu'' - (\nu')^2] \right\}, \quad (1)$$

Это выражение записано как функция температуры T , объема V и числа электронов N . Здесь k – постоянная Больцмана, β – магнитный момент электрона, $\nu = \nu(\eta)$ – плотность энергетических состояний электронов, ν' и ν'' – ее производные, $\eta = \eta(N/V)$ – химический потенциал, определяющийся уравнением

$$\int_0^{\eta} d\epsilon \nu(\epsilon) = N/2V,$$

наконец, ψ – константа обменного взаимодействия.

Имея в виду, необходимость интерпретации экспериментальных данных в переменных температура T , давление P , число электронов N , запишем давление металла в виде $P = P_0(V, N) + \Delta P(T, V, N)$, где ΔP – исчезающая при $T=0$ добавка к давлению. Эта формула (ср. ⁴) позволяет выразить объем V через давление $V = V_0(P, N) + \Delta V(T, P, N)$, где V_0 является решением уравнения $P = P_0(V, N)$. С помощью такого соотношения легко перейти в выраже-

нии (1) от переменной V к давлению. В результате получаем

$$\chi^{-1}(T, P, N) = \frac{1 + 2\bar{\psi}\bar{v}}{2\beta^2\bar{v}} \left\{ 1 - \frac{(\pi\kappa T)^2}{6\bar{v}^2} \frac{[\bar{v}\bar{v}'' - (\bar{v}')^2]}{1 + 2\bar{\psi}\bar{v}} - \frac{\Delta V(T, P, N)}{V_0(P, N)} \left[\frac{\partial \ln \chi(0, V, N)}{\partial \ln V} \right] \right\}. \quad (2)$$

Здесь знак черта над функциями означает переход от переменной V к давлению.

Мы ставим перед собой цель показать важность явления теплового расширения для понимания температурной зависимости магнитной восприимчивости. Для этого мы проведем сравнение с экспериментом формулы (2), в которой ниже, в отличие от работы ², полностью пренебрежем традиционным вкладом $\sim T^2$.

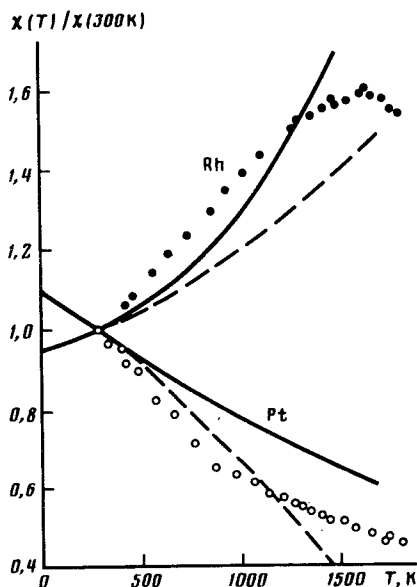


Рис. 1. Температурная зависимость парамагнитной восприимчивости Pt и Rh. Экспериментальные данные взяты из работы ⁶

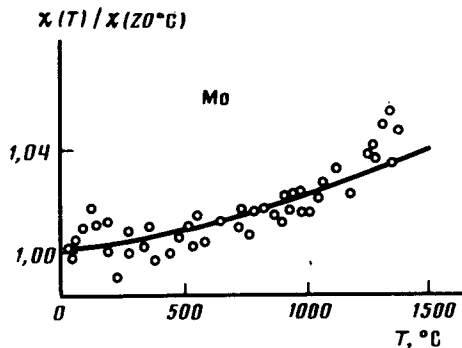


Рис. 2

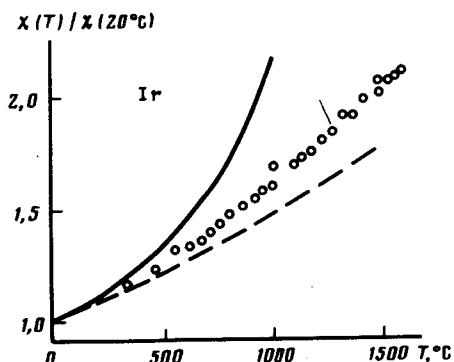


Рис. 3

Рис. 2. Температурная зависимость парамагнитной восприимчивости Mo. Экспериментальные результаты взяты из работы ⁶

Рис. 3. Температурная зависимость парамагнитной восприимчивости Ir. Экспериментальные результаты взяты из работы ⁶

Здесь нужно отметить, что $\Delta V/V_0$ хорошо известно для широкого круга металлов (см., например, ⁵). Значительно меньше достоверных сведений о $[\partial \ln \chi(0)/\partial \ln V]$. Поэтому ниже мы проиллюстрируем важность эффекта теплового расширения на нескольких примерах.

На рис. 1 – 3 приведены температурные зависимости магнитной восприимчивости. Сплошные кривые вычислены по формуле

$$\chi^{-1}(T) = \chi^{-1}(0) \left\{ 1 - \frac{\Delta V(T)}{V_0} \left[\frac{\partial \ln \chi(0)}{\partial \ln V} \right] \right\}, \quad (3)$$

а пунктирные — по формуле

$$\chi(T) = \chi(0) \left\{ 1 + \frac{\Delta V(T)}{V_0} \left[\frac{\partial \ln \chi(0)}{\partial \ln V} \right] \right\} \quad (4)$$

Экспериментальные данные взяты из работы ⁶. Расчетные кривые построены при использовании значений $(\partial \ln \chi(0)/\partial \ln V)$, равных $-15; 9,6; 1,2$ и 22 соответственно для Pt, Rh, Mo и Ir согласно ^{7,8}. Эти примеры выбраны нами из соображений описания качественно (рис. 1) и количественно (рис. 2 и 3) различных температурных зависимостей на основе единого явления — теплового расширения. Для упрощения сравнения вскрываемых нами закономерностей с обсуждаемыми в обычном подходе, пренебрегающем влиянием теплового расширения, мы также как и в работе ² совмещаем экспериментальные и теоретические кривые при $T = 300$ К (ср. рис. 11 и 12 статьи ²).

В случае рис. 2, пунктирная кривая совпадает со сплошной. Напротив, на остальных рисунках такие кривые сильно различаются, что указывает на чрезвычайно сильное влияние теплового расширения. Для количественного сравнения теоретических кривых с экспериментальными данными необходимо, прежде всего, точное знание величины $(\partial \ln \chi(0)/\partial \ln V)$. Определение этой производной по измерению только продольной парамагнетострикции может приводить к большой ошибке вплоть до изменения знака величины, как это следует из работ ^{7,8}. С другой стороны, в области высоких температур, во-первых, становятся существенными члены $\sim T^2$ в выражении (2), которые могут конкурировать с эффектом теплового расширения и приводить к появлению максимума на кривой как, например, для Rh при $T \approx 1600$ К. Во-вторых, расхождение экспериментальных данных и кривой, построенной по формуле (3) для Ir (рис. 3) в области высоких температур $T \gtrsim 1000^\circ$ С, может быть, обусловлено чрезвычайно большим влиянием теплового расширения на парамагнитную восприимчивость, когда приближенное выражение (3) перестает быть справедливым.

В заключение заметим, что в модели, пренебрегающей зависимостью константы обменного взаимодействия ψ от объема (или давления), знак температурной зависимости парамагнитной восприимчивости определяется знаком ν' — первой производной плотности энергетических состояний на уровне Ферми.

Таким образом, мы показали, что тепловое расширение существенным образом влияет на температурную зависимость магнитной восприимчивости металлов. Можно думать, что в определенных условиях, аналогичное влияние может оказаться существенным и для металлов в магнитоупорядоченном состоянии.

Литература

1. Вонсовский С.В. Магнетизм. М.: Наука, 1971.
2. Shimizu M. Rept. Prog. Phys., 1981, 44, 329.
3. Ирхин Ю.П., Носкова Л.М., Розенфельд Е.В. ФТТ. 1984. 26, 787.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика, М.: Наука, 1973, ч. 1.
5. Новикова С.И., Тепловое расширение твердых тел, М.: Наука, 1974.
6. Kojima H., Tebble R.S., Williams D.E.G. Proc. Roy. Soc., 1961, 260, 237.
7. Fawcett E. Phys. Rev. B, 1970, 2, 3887.
8. Fawcett E., Pluzhnikov V. Physica B + C, 1983, 119, 161.

Физический институт им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
28 февраля 1986 г.

После переработки
8 апреля 1986 г.