

ФИЗИКА

Ф. ГАЛЬПЕРИН

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ УПОРЯДОЧЕННЫХ СПЛАВОВ

(Представлено академиком А. А. Лебедевым 2 X 1950)

Экспериментально изучено пять ферромагнитных упорядоченных сплавов: Ni_3Mn , Ni_3Fe (с гранецентрированной кубической решеткой) FeCo (с объемноцентрированной кубической решеткой), MnBi и CrTe (с никельарсенидной решеткой). Первые два были выплавлены в высокочастотной индукционной печи в вакууме, прокованы в прутки, из которых после отжига в вакууме были изготовлены эллипсоиды, затем закалены в воду для получения неупорядоченных состояний и в таком виде исследованы. После этого они отпускались с ряда температур, при которых выдерживались разное время с целью определения режима, необходимого для полного упорядочения; на всех этих стадиях термообработки измерялось намагничение.

Третий сплав был выплавлен в такой же печи под флюсом (молибденовое стекло) и разлит в цилиндры (виду того что он не куется), из которых после отжига были выточены эллипсоиды и далее, как описано выше. Последние два сплава были получены путем спекания в вакууме мелкодисперсных, хорошо перемешанных порошков, спрессованных в цилиндрики⁽¹⁾. Эти цилиндрики нагревались до различных температур, при которых они выдерживались некоторое время; далее магнитным (измерялось намагничение и его зависимость от температуры спекания) и рентгеновским методом определялось, при какой оптимальной температуре спекания образуются лишь гомогенные упорядоченные структуры MnBi и CrTe . Получение последних оказалось нелегким делом, в особенности в случае MnBi ^{*}. При других температурах спекания, наряду с ферромагнитной фазой MnBi , появляется еще парамагнитная фаза. Намагничение измерялось в соленоиде, в котором можно было получать поля до 8000 эрст., а парамагнитная восприимчивость — на несколько видоизмененной установке Сексмита^(3,1)^{**}.

Автором был предложен и другой метод (измерение парамагнитной восприимчивости) определения температуры образования ферромагнитных сплавов из неферромагнитных компонентов. Состоит он в следующем (на примере MnBi).

В ампулу, подвешенную между полюсами электромагнита парамагнитной установки, помещена смесь порошков Mn и Bi (с концентрацией 50 ат. %). Восприимчивость смеси при комнатной температуре складывается из восприимчивости марганца (парамагнетик) и висмута (диамагнетик) и поэтому, естественно, она меньше, чем у марганца.

* В частности, Тильману⁽²⁾ оно не удалось.

** Измерения проводились совместно с Т. Перекалиной.

Как видно из рис. 1, восприимчивость смеси при повышении температуры до 200° не меняется и только выше этой температуры начинает слабо расти. При температуре около 315° этот рост

становится очень быстрым, восприимчивость достигает огромной величины, измерить которую на парамагнитной установке уже не удается, что говорит о появлении при этом ферромагнетика MnBi; определенная указанными выше методами оптимальная температура спекания оказалась также равной 315° . При дальнейшем нагревании восприимчивость сначала резко падает, а затем при температуре, несколько большей, чем 400° , начинает расти по прямолинейному закону. Пунктиром на рис. 1 показано, какой ход имела бы кривая, если бы не шло образования ферромагнитных кристаллов MnBi.

На рис. 2 дан в более крупном масштабе второй участок этой кривой (начиная с 400°) и обратный ее ход при охлаждении. Заметим еще, что описанным методом можно также определить точку Кюри. Ей соответствует резкое возрастание восприимчивости при охлаждении (рис. 2). Для MnBi она оказалась равной около 350° . Такое же значение она имеет, если ее определить совершенно другим методом — из температурной зависимости намагничения. Таким образом, предложенный нами метод оказывается полезным для рассмотренных целей*.

Экспериментальные значения намагничения упомянутых сплавов были пересчитаны на соответствующие им атомные магнитные моменты, с которыми были сравнены моменты, вычисленные по формулам Ф. Гальперина (4).

Атомные магнитные моменты m_{yn} упорядоченных ферромагнитных бинарных сплавов, состоящих из компонентов A, B с атомными концентрациями C_A , C_B , ..., могут быть вычислены по формуле:

$$m_{yn} = M_{0, A} C_A - M_{0, AB} C_{AB} + M_{0, B} C_B; \quad (1)$$

$$M_{0, A} = 2m_{0, A} + K_{d, AA} (d_{AA} - D_A) \pm K_{a, AA} (a_{AA} - D_A). \quad (1^1)$$

$$M_{0, AB} = 1,28 (\sigma' + ZC_B) (l_{AB} - D_{AB}); \quad (1^2)$$

$$M_{0, B} = \pm m_{0, B}; \quad D_{AB} = \frac{D_A + D_B}{2}; \quad C_{AB} = \frac{C_A + C_B}{2}. \quad (1^3)$$

* Он оказался весьма плодотворным также для изучения фазовых превращений и процессов упорядочения в парамагнитных сплавах. В частности, этим методом недавно нами было обнаружено упорядочение в марганец-кобальтовых сплавах, предсказанное автором еще в 1947 г.

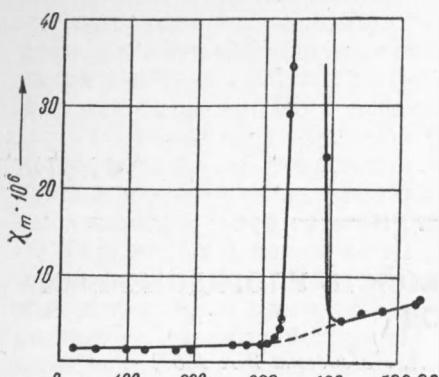


Рис. 1

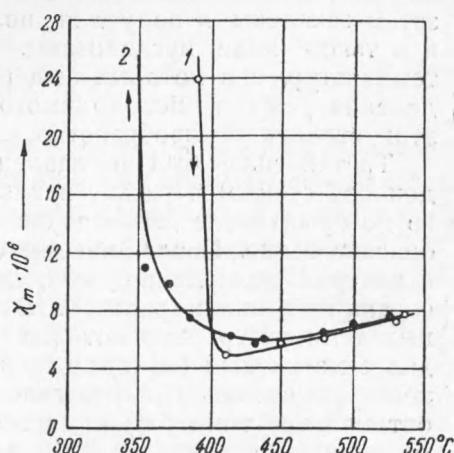


Рис. 2. 1 — нагрев, 2 — охлаждение

M_0 , A — атомный магнитный момент, который имел бы компонент А при условии, что его атомы занимают все места в решетке сплава, сохраняя существующие в ней (решетке) межатомные расстояния. Для переходных металлов $m_0 = 10 - n$ (n — число валентных электронов в изолированном атоме металла). Индексы А, В внизу у какой-нибудь величины указывают на ее принадлежность к компонентам А, В. $d_{AA}(a_A)$ — расстояние между атомом компонента А и его ближайшими (следующими по дальности) соседями в кристаллической решетке сплава, удовлетворяющей упомянутому условию (все ее места заняты атомами компонента А). $K_{d, AA}(K_{a, AA}) = 0,6416 Z_d(Z_a)$, где $Z_d(Z_a)$ — число соседей, находящихся на расстоянии $d_{AA}(a_{AA})$ от атома компонента А. l_{AB} — расстояние между атомом компонента А и его ближайшими иносортными соседями в решетке сплава. $K_{l, AB} = 0,6416 Z_l$, где Z_l — число иносортных соседей, находящихся на расстоянии l_{AB} от атома компонента А.

$Z = Z_d + Z_l + Z_a + \dots$ представляет собою полное число ближайших соседей; для гранецентрированной и объемноцентрированной кубических решеток оно равно, соответственно, 12 и 14. Для полно-

Таблица 1

Атомные магнитные моменты упорядоченных сплавов

Упорядоченный сплав	Ni ₃ Mn	Ni ₃ Fe	FeCo	MnBi	CrTe
Тип решетки	A1	A1	A2	NiAs	NiAs
C_A	0,75	0,75	0,50	0,50	0,50
C_B	0,25	0,25	0,50	0,50	0,50
$n_A; m_{0,A}$	10; 0	10; 0	8; 2	7; 0	6; 0
$n_B; m_{0,B}$	7; 0	8; 2	9; 1		
Наименьшее меж- атомное расстояние	2,543	2,508	2,485	3,035(2)* 4,260(6)*	3,08(2)* 3,952(6)*
d_{AA}					
Z_d	8	8	8	2; 6	2; 6
$K_{d, AA} = 0,6416 Z_d$	5,13	5,13	5,13	1,28(2)* 3,85(6)*	1,28(2)* 3,85(6)*
Наименьшее меж- атомное расстояние	2,543 ⁽⁵⁾	2,508 ⁽⁶⁾	2,868 ⁽⁷⁾	2,85 ⁽³⁾	2,769 ⁽¹⁾
a_{AA}					
Z_a	4	4	6	6	6
$K_{a, AA} = 0,6416 Z_a$	2,56	2,56	3,85	3,85	3,85
D_A	2,41	2,41	2,73	2,86	3,06
D_B	2,86	2,73	2,54	—	—
$D_{AB} = \frac{D_A + D_B}{2}$	2,635	2,57	2,635	—	—
Наименьшее меж- атомное расстояние	2,543	2,508	2,485	—	—
l_{AB}					
Число соседей атома на расстоянии l_{AB}	4	4	8	—	—
$K_{l, AB} = 0,6416 Z_l$	2,56	2,56	5,13	—	—
m_{yn} , выч.	1,0	1,22	2,37	2,83	2,29
m_{yn} , опытн.	0,9 ⁽⁸⁾	1,2 ⁽¹⁰⁾	2,35 ⁽⁷⁾	2,74 (автор)	2,40 ⁽¹¹⁾
$m_{yn} - m_{neup}$, выч.	1,0 ⁽⁹⁾	1,2 (автор)	2,36 (автор)	3,13 ^{(8)**}	2,44 ⁽⁴⁾
$m_{yn} - m_{neup}$, опытн.	0,81	0,04	0,10	—	—
	0,82 (автор)	0,05 (автор)	0,10 ⁽⁷⁾	—	—
			0,11 (автор)		

* В скобках указано число соседей на таком расстоянии.

** Тильман сам считает, что его данным нельзя придавать большого значения.

стью упорядоченного сплава $\sigma = 1$, а для полностью неупорядоченного $\sigma = 0$. Знак минус перед последним членом в (1¹) берется при $a_{AA} > D_A$; знак плюс — в противном случае, если $m_{0,A} > 0$; если же $m_{0,A} = 0$, то наоборот. Знак плюс перед $m_{0,B}$ в (1³) соответствует компоненту В, ферромагнитному в чистом виде, а знак минус — неферромагнитному в чистом виде.

Известно, что некоторые переходные металлы, парамагнитные в чистом виде, ферромагнитны в сплавах (как марганец в Ni_3Mn), т. е.: а) будучи растворимым В в сплаве с ферромагнитным растворителем А они до определенных своих концентраций повышают момент последнего (как марганец в никеле, платина в железе и т. д.); б) будучи вторым компонентом В в упорядоченном сплаве с ферромагнитной основой А они придают ему (сплаву) более высокий момент, чем у неупорядоченного сплава (как марганец в Ni_3Mn), и, наконец, в) они сами являются основой А ферромагнитных упорядоченных фаз или химических соединений из неферромагнитных в чистом виде компонентов (как марганец в $MnBi$ или Mn_4N , хром в $CrTe$ и т. д.). Нами было показано (1²), что в таких случаях $m_{0,B}$ для рассматриваемых металлов равно нулю, т. е. в случаях а) и б) $m_{0,B} = 0$, а в случае в) $m_{0,B} = 0$.

Отсюда следует, что если компонент В, парамагнитный в чистом виде, ферромагнитен в упорядоченном сплаве ($m_{0,B} = 0$), а в неупорядоченном сплаве парамагнитен ($m_{0,B} \neq 0$), то момент m_{up} должен отличаться от момента m_{neup} на величину $m_{0,B}C_B$; кроме того, еще на разность между значениями второго члена в (1), вызванную тем, что для упорядоченного сплава $\sigma = 1$, а для неупорядоченного $\sigma = 0$. Итак,

$$m_{up} - m_{neup} = m_{0,B}C_B - 0,6416(l_{AB} - D_{AB}), \quad (1^4)$$

где $m_{0,B}$ теперь уже равно, по определению, $10 - n$, а не нулю для металлов парамагнитных в чистом виде и нулю для ферромагнитных в чистом виде.

В табл. 1 приводятся данные для вычисления атомных магнитных моментов упорядоченных и неупорядоченных сплавов по формулам Гальперина. Вычисленные и опытные значения находятся в удовлетворительном согласии.

Поступило
27 IX 1950

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Ф. Гальперин и Т. Перекалина, ДАН, **69**, 19 (1949). ² K. Thielmann, Ann. d. Phys., **37**, 41 (1940). ³ W. Sucksmith and R. Pearce, Proc. Roy. Soc., **167**, 189 (1938). ⁴ Ф. Гальперин, Изв. АН СССР, сер. физич., **13**, 574 (1949). ⁵ R. Forrer, Journ. de Phys. et le Rad., **4**, 109 (1933). ⁶ A. Bradley, A. Jay and A. Taylor, Phil. Mag., **23**, 545 (1933). ⁷ M. Fine and W. Ellis, Metals Technology, No. 2 (1948). ⁸ А. Комар и Н. Волкенштейн, ЖЭТФ, **11**, 711 (1941). ⁹ Ф. Гальперин и Т. Перекалина, ЖЭТФ, **20**, 73 (1950). ¹⁰ E. M. Gorbachev, Phys. Rev., **57**, 728 (1940). ¹¹ M. Guillard, C. R., **222**, 386, 1224 (1946). ¹² Ф. Гальперин, ДАН, **75**, № 4 (1950).