

О. С. ИВАНОВ и Ю. М. КАЗИМИРОВ

**ПРИЧИНА ИЗМЕНЕНИЯ МАГНИТНОГО НАСЫЩЕНИЯ  
ЖЕЛЕЗО-НИКЕЛЬ-АЛЮМИНИЕВЫХ ВЫСОКОКОЭРЦИТИВНЫХ  
СПЛАВОВ ПРИ ОТПУСКЕ**

*(Представлено академиком И. И. Черняевым 8 IX 1951)*

У железо-никель-алюминиевых высококоэрцитивных сплавов наблюдается повышение магнитного насыщения при отпуске их на 500—600°. Это явление используется в практике обработки постоянных магнитов для повышения остаточного магнетизма и исследовалось в ряде работ. Так, на сплаве с 26,5% (22,6 ат. %) Ni и 12,3% (22,8 ат. %) Al было показано<sup>(1)</sup>, что увеличение  $4\pi I_{\infty}$  имеет место при отпуске до 600° после различных предварительных обработок: резкой закалки, охлаждения с критической скоростью, дающего максимальную коэрцитивную силу, а также после охлаждения со скоростью больше или меньше критической. Б. Г. Лившиц наблюдал указанное явление у сплава с 27% (22,4 ат. %) Ni и 15% (27,1 ат. %) Al<sup>(2)</sup>. В обеих упомянутых работах данное явление объясняется тем, что при отпуске происходит увеличение степени дальнего порядка в расположении атомов в кристаллической решетке  $\beta_2$ -твердого раствора. Имеющее место при дальнейшем повышении температуры отпуска снижение магнитного насыщения после прохождения через максимум объясняется, во-первых, разупорядочением  $\beta_2$ -фазы, во-вторых, распадом твердого раствора. Распад, по мнению Б. Г. Лившица, приводит к дополнительному нарушению порядка. То, что сплав, предварительно закаленный и отпущенный на минимум магнитного насыщения, при повторном отпуске на 600° обнаруживает повышение магнитного насыщения, считается одним из основных доказательств наличия процесса упорядочения.

Предположение, что упорядочение должно приводить к увеличению магнитного насыщения, произвольно. При построении диаграммы состояния Fe—Ni—Al<sup>(3)</sup> было обнаружено, что сплавы разреза Fe—NiAl с 0—65 ат. % железа обладали дальним порядком даже после закалки с 1100°.

Излагаемые ниже экспериментальные данные обосновывают другую точку зрения на причину рассматриваемого явления. Было изучено изменение магнитного насыщения закаленных с 1100° сплавов разреза Fe—NiAl в процессе отпуска на постепенно повышающиеся температуры от 400 до 850° с выдержкой 3 часа при каждой температуре и последующей закалкой в воде; при отпуске на 650—725° образцы с  $d=3$  мм охлаждались на воздухе. Оказалось, что повышение магнитного насыщения при отпуске наблюдается не у всех сплавов. Наличие этого явления и его количественный эффект сильно зависят от состава сплава (см. рис. 1). У сплавов с большим содержанием железа (90—70 ат. %) при отпуске вначале наблюдается снижение

магнитного насыщения по сравнению с закаленным состоянием. После прохождения минимума, соответствующего приблизительно  $700^\circ$ , магнитное насыщение растет, но при  $850^\circ$  еще не достигает исходного значения. Для сплавов, содержащих менее 55 ат. % железа, изменение магнитного насыщения иное. Вначале оно растет, достигает максимума, а затем уменьшается. Максимум магнитного насыщения для всех сплавов, у которых он наблюдается, соответствует приблизительно  $500^\circ$ . На рис. 2 показана зависимость магнитного насыщения сплавов разреза Fe — NiAl от состава. Линия 1 соответствует закаленному состоянию, 2 — отпуску на  $500^\circ$ . Ход обзих линий хорошо объясняется, если исходить из того, что при  $500^\circ$  твердый раствор уже распадается на

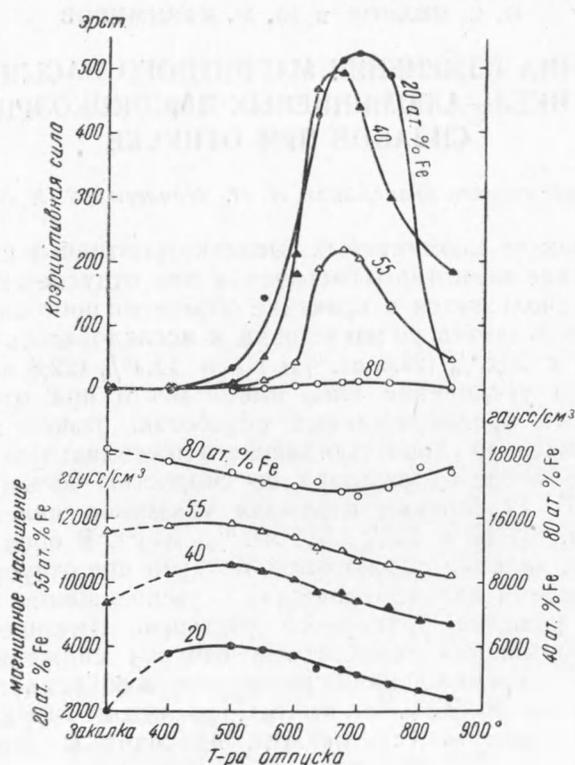


Рис. 1. Изменение магнитного насыщения и коэрцитивной силы для некоторых сплавов разреза Fe — NiAl при отпуске после закалки

две фазы  $\beta$  и  $\beta_2$ , состав которых, согласно (4), близко соответствует чистому железу и соединению NiAl.

Для закаленного с  $1100^\circ$  состояния, когда сплавы представляют непрерывный ряд твердых растворов, кривая магнитного насыщения расположена выше прямой, относящейся к двухфазному состоянию, для высоких содержаний железа и ниже ее для малого процента железа. Очевидно, часть атомов никеля, будучи распределена в среде, в которой преобладают атомы железа, участвует в ферромагнетизме, в то время как во втором случае атомы железа, распределенные среди преобладающего числа атомов никеля и алюминия, теряют свою способность придать сплаву ферромагнетизм, а атомы никеля оказываются связанными в молекулы парамагнитного соединения NiAl.

Линейная зависимость  $4\pi I_\infty$  от состава для отпущенных на  $500^\circ$  сплавов хорошо согласуется с тем, что они представляют смесь  $\beta + \beta_2$ , причем  $\beta$ -фаза является почти чистым железом с магнитным насыщением

21500 гаусс/см<sup>3</sup>, а  $\beta_2$  — парамагнитным соединением NiAl, растворившим около 2 ат. % железа. Линейная зависимость здесь получается также благодаря тому, что разрез Fe — NiAl параллелен направлению конод двухфазной области  $\beta + \beta_2$ , и из-за близости параметров решетки  $\beta$  и  $\beta_2$ -фаз грамм-атомный объем сохраняет почти одно и то же значение вдоль всего разреза. Ход линий 1 и 2 на рис. 2 полностью соответствует данным, приведенным в работе (5).

Изменение электросопротивления при нагреве закаленных сплавов показывает также, что при 500—600° имеет место распад на  $\beta + \beta_2$ -состояние, а не упорядочение. Это видно из того, что величина снижения электросопротивления  $\Delta\rho_1$  закаленных образцов при нагреве до 500—600° (3) зависит от состава в рассматриваемом разрезе так, как представлено на рис. 4. Если бы снижение электросопротивления обуславливалось упорядочением  $\beta_2$ -твердого раствора по типу решетки NiAl, то естественно было бы иметь максимальный эффект при составе самого соединения NiAl. В действительности снижение электросопротивления спадает при составе соединения до нуля (см. рис. 4). Ход кривой  $\Delta\rho_1$  в точности отображает изменение  $\Delta\rho_2$  — разности электросопротивления для закаленного с 1100° и отожженного состояний. Тем самым доказывается, что происходящим при нагреве до 500—600° процессом и причиной роста при этих температурах магнитного насыщения является распад  $\beta_2 \rightarrow \beta + \beta_2$ .

Сделанное заключение приводит к существенному выводу о соотношении между коэрцитивной силой  $H_c$  и степенью распада исходного твердого раствора. Действительно, если изменение магнитного насыщения показывает, что распад осуществляется полностью при отпуске на 500°, то  $H_c$  в этот момент достигает величин лишь в несколько десятков эрстед. Максимальные значения  $H_c$  получаются только после отпуска в районе 600—700°, когда магнитное насыщение значительно изменилось. С точки зрения новейшей теории высококоэрцитивной силы в рассматриваемых сплавах, где она относится за счет образования однодоменных выделений  $\beta$ -фазы внутри парамагнитной  $\beta_2$ -фазы, это естественнее всего объяснить тем, что при 500° распад приводит к равноосным выделениям  $\beta$ -фазы, которые затем при более высокой температуре, благодаря направленному росту, превращаются в неравно-

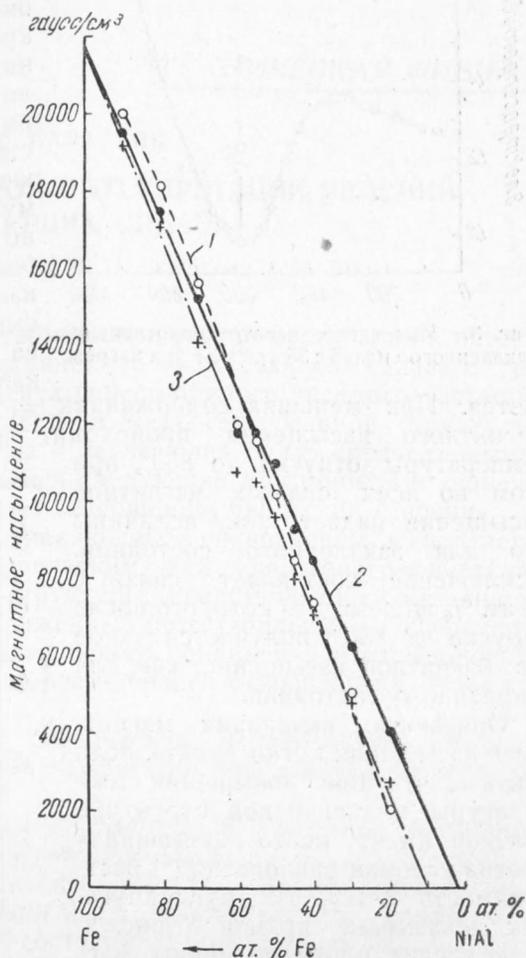


Рис. 2. Зависимость магнитного насыщения от состава в разрезе Fe — NiAl: 1 — после закалки с 1100°, 2 — после отпуска на 500°, 3 — после отпуска на 750°

осные, приобретая вытянутую в одном направлении форму, а вместе с тем, из-за большого различия размагничивающих факторов, и высокую коэрцитивную силу.

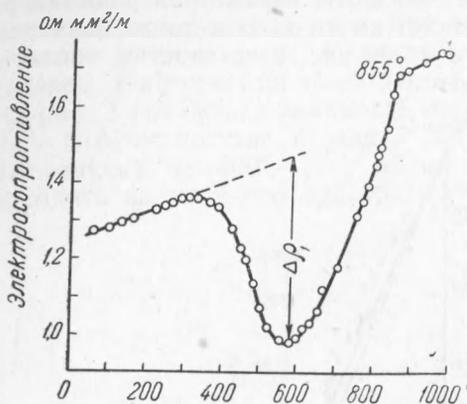


Рис. 3. Изменение электросопротивления закаленного сплава с 35 ат. % Fe при нагреве

гается. При меньших содержаниях магнитного насыщения происходит непрерывно при повышении температуры отпуска до 850°, при этом во всех сплавах магнитное насыщение падает ниже величины его для закаленного состояния. Исключение составляет сплав с 20 ат. % железа, для которого после отпуска на 850° получается такое же магнитное насыщение, как для закаленного состояния.

Описанные изменения магнитного насыщения легко понять, если считать, что при повышении температуры и дисперсной структуре сплавов имеет место повышенная против условий равновесия (4) растворимость  $\beta$ - и  $\beta_2$ -фаз друг в друге. Как показывает прямая 3 рис. 2, проведенная через величины магнитного насыщения сплавов после отпуска на 750°, при этом изменение состава  $\beta_2$ -фазы значительнее, чем изменение состава фазы  $\beta$ . Именно переход железа в парамагнитную фазу  $\beta_2$  обуславливает снижение магнитного насыщения сплавов.

Институт общей и неорганической химии  
им. Н. С. Курнакова  
Академии наук СССР

Поступило  
5 I 1951

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> J. W. Snoek, Die Probleme der technischen, Magnetisierung-Kurve, Berlin, 1938.  
<sup>2</sup> Б. Г. Лившиц, Высококоэрцитивные сплавы, М., 1945. <sup>3</sup> О. С. Иванов, Изв. СХФА АН СССР, 19, 503 (1949). <sup>4</sup> О. С. Иванов, ДАН, 78, № 6 (1951).  
<sup>5</sup> J. W. Snoek, Physica, 6, 321 (1939).

Далее, необходимо объяснить наблюдающееся изменение магнитного насыщения при повышении температуры отпуска в районе выше 500°. Как показывают кривые рис. 1, происходит понижение магнитного насыщения до некоторого минимума, это имеет место в сплавах всех составов. При высоких содержаниях железа (90—60 ат. %) этот минимум достигается при сравнительно низких температурах, а при более высоком отпуске начинается повышение магнитного насыщения, причем после отпуска на 850° магнитное насыщение закаленного состояния не достигается.

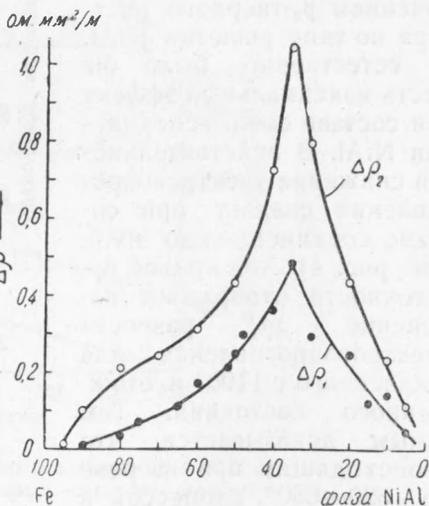


Рис. 4. Зависимость  $\Delta\rho_1$  и  $\Delta\rho_2$  от состава в разрезе Fe — NiAl