

Влияние нанокристаллической структуры на формирование антиферромагнитного порядка в сплаве Ni₃Mn

Мулюков Х.Я.¹, Шарипов И.З.^{2,†}

† ilgizsh@mail.ru

¹Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Халтурина 39, 450001 Уфа

²Уфимский государственный авиационный технический университет, ул. К.Маркса 12, 450000 Уфа

Effect of nanocrystalline structure on antiferromagnetic order formation in Ni₃Mn alloy

Kh. Ya. Mulyukov¹, I. Z. Sharipov²

¹Institute for Metals Superplasticity Problems RAS, Khalturin St. 39, 450001 Ufa

²Ufa State Aviation Technical University, K. Marx St. 12, 450000 Ufa

Исследуется влияние нанокристаллической структуры на формирование антиферромагнитного порядка в сплаве Ni₃Mn методом измерения температурной зависимости намагниченности. Показано, что антиферромагнитный порядок в сплаве с нанокристаллической структурой обладает меньшей устойчивостью, чем в сплаве с крупно зернистой структурой.

Ключевые слова: антиферромагнитный порядок, нанокристаллическая структура, намагниченность, упорядочение сплава.

The effect of nanocrystalline structure on the formation of antiferromagnetic order in Ni₃Mn alloy is investigated by means of measuring thermal dependence of magnetization. It is shown that the stability of antiferromagnetic order in the nanocrystalline alloy is less than that in the coarse grained alloy.

Keywords: antiferromagnetic order, nanocrystalline structure, magnetization, ordered alloy.

Введение

Известно, что при переходе структуры материалов в нанокристаллическое (НК) состояние происходит существенное изменение их физических свойств [1-3], что в значительной мере обусловлено высокой плотностью дефектов в структуре материала в этом состоянии и малостью самих кристаллитов. Влияние НК структуры проявляется даже на фундаментальных магнитных свойствах магнитоупорядоченных веществ, которые ранее считались структурно нечувствительными [4, 5]. Изменение фундаментальных магнитных свойств ферромагнетиков, таких как намагниченность насыщения и точка Кюри, в материалах с НК структурой, по-видимому, объясняется искажением магнитного порядка в окрестностях структурных дефектов. При этом следует отметить, что антиферромагнитный (АФМ) порядок более чувствителен к дефектам кристаллической структуры, чем ферромагнитный (ФМ) порядок [6].

В данном сообщении приводятся результаты исследования влияния НК структуры на магнитный порядок, формирующийся в сплаве Ni₃Mn в процессе упорядочения.

Методика

Исследования проводились на сплаве с химическим составом (вес %): Ni – 74.0; Mn – 24.0; Mo – 1.0; Fe – 0.6; Al – 0.4. Химический состав определялся на рентгеновском микроанализаторе JXA-6400. Измерения проводились на двух образцах: с крупнозернистой (КЗ) и НК структурами. Образец с КЗ (размеры кристаллитов ~ 50 мкм) структурой был вырезан из прокатанной ленты и отожжен при 1070 К в течение одного часа. НК структуру получали методом интенсивной пластической деформации пластинки на наковальнях Бриджмена при комнатной температуре, под квазигидростатическим давлением 6 ГПа и степени сдвиговой деформации $\epsilon=7$. В результате была сформирована довольно однородная структура с размером кристаллитов около 30 нм. Упорядоченное состояние образцов с КЗ и НК структурами было получено в процессе отжига при температуре 740 К в вакууме 10⁻³ Па в течение 24 часов. Данный сплав в упорядоченном состоянии является ферромагнитным и величина его намагниченности насыщения зависит от степени порядка. Поэтому исследование температурной зависимости намагниченности насыщения в этом

случае дает, во-первых, сведения о степени его упорядоченности, во-вторых, - сведения о магнитном фазовом составе исследуемого сплава.

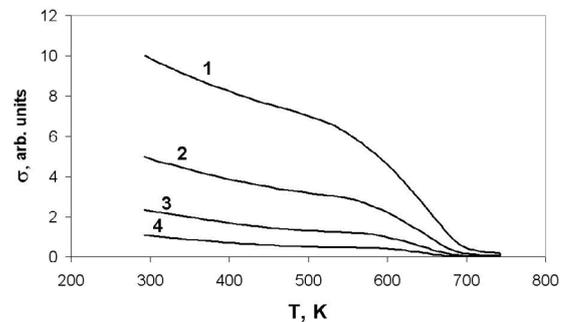
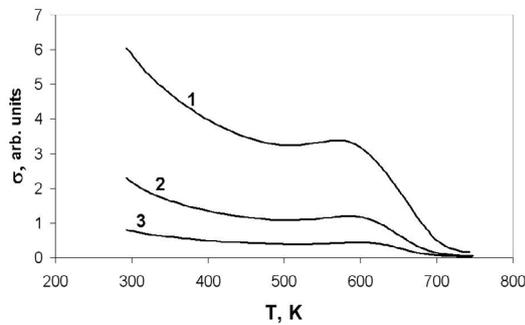
Результаты и их обсуждение

На рис. 1а представлены кривые температурной зависимости намагниченности КЗ образца ($\sigma(T)$), снятые при различных значениях напряженности магнитного поля (H), в котором находится образец во время измерений. Как видно, эти три кривые различаются. При возрастании напряженности магнитного поля H величина намагниченности σ растет, что свидетельствует о недостаточности напряженности приложенного поля для намагничивания образца до насыщения. Значение намагниченности σ в некоторой области температур уменьшается, проходит через минимум, затем возрастает, т.е. на кривых $\sigma(T)$ образуется характерный прогиб. Подобное уменьшение и затем рост намагниченности насыщения на этом сплаве наблюдали и ранее [7, 8], но в другой температурной области. На рис.1б приведены аналогичные графики для НК образца. В этом случае общий ход кривых $\sigma(T)$ в целом сохраняется, но кривые убывают монотонно, не образуя прогиба.

Причина такого своеобразия формы кривых $\sigma(T)$ для КЗ образца не является очевидной. Намагниченность исследуемого сплава формируется в результате обменного взаимодействия между разного рода атомами Ni-Ni, Ni-Mn и Mn-Mn. Измеряемое значение намагниченности будет обусловлено магнитным порядком, который

сформируется в результате конкуренции трех обменных взаимодействий между перечисленными выше парами. Результирующее значение σ будет зависеть от воздействия внешних факторов, таких как магнитное поле H и температура. Т.е. необходимо учесть взаимодействие магнитных моментов атомов с внешним магнитным полем и разупорядочивающее воздействие теплового движения. Заметное уменьшение величины намагниченности в некоторой области температур можно объяснить образованием АФМ порядка при взаимодействии атомов Mn. Как известно, при нагревании кристалла происходит увеличение межатомных расстояний, а обменный интеграл в свою очередь является функцией расстояния между атомами. Поэтому в зависимости от величины этого расстояния в кристалле может быть сформирован ФМ или АФМ порядок атомов Mn.

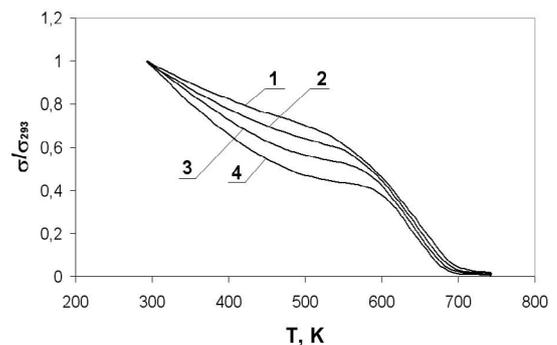
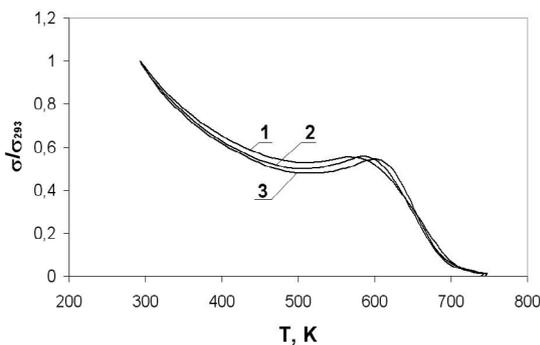
Анализ влияния напряженности магнитного поля на форму кривых $\sigma(T)$ удобнее провести, пронормировав их на величину намагниченности при комнатной температуре. Эти нормированные кривые приведены на рис. 2. Широкий прогиб, наблюдаемый на кривых $\sigma(T)$ для КЗ образца, по-видимому, свидетельствует о том, что в области температур от 400 до 600 К в исследуемом сплаве магнитные моменты некоторой части атомов образуют АФМ порядок. Приложение внешнего магнитного поля будет препятствовать переориентации магнитных моментов атомов при возникновении АФМ порядка. Поэтому в этом случае начало формирования АФМ порядка должно сдвигаться к более высоким температурам. Действительно, на рис. 2а, видно, что нормированная кривая $\sigma(T)$, измеренная при более сильных полях, проходит



а

б

Рис. 1. Температурные зависимости намагниченности сплава Ni₃Mn в КЗ (а) и НК (б) состояниях. Напряженности магнитного поля H для кривых соответственно равны: 1 – 240 кА/м, 2 – 120 кА/м, 3 – 60 кА/м, 4 – 30 кА/м.



а

б

Рис. 2. Нормированные кривые температурной зависимости намагниченности сплава Ni₃Mn в КЗ (а) и НК (б) состояниях.

выше, т.е. это означает, что прогиб кривых $\sigma(T)$ в сильных полях начинается при более высоких температурах.

Влияние магнитного поля на формирующийся АФМ порядок проявляется и на ширине прогиба упомянутых кривых. Увеличение напряженности магнитного поля должно приводить к сужению температурной области прогиба кривых $\sigma(T)$, т. к. внешнее магнитное поле стремится повернуть моменты атомов в одну сторону. Приведенные графики как раз показывают такую тенденцию обсуждаемых кривых.

Наконец, следует указать на то, что влияние поля H на АФМ порядок должно отражаться на глубине прогиба кривых $\sigma(T)$. Так с усилением магнитного поля формирование АФМ порядка будет затруднено, доля упорядоченных таким образом атомов уменьшится, значит глубина прогиба должна уменьшаться. И это предположение подтверждается полученными результатами. Если при величине $H=60$ кА/м глубина прогиба составляет 11,3 %, то при большей напряженности поля $H=240$ кА/м она равна 3,9 %.

На рис. 2б приведены кривые $\sigma(T)$ для образца с НК структурой. На этих кривых, в отличие от зависимостей $\sigma(T)$ для КЗ образца прогиба с минимумом и максимумом нет, намечен только некоторый перегиб или изменение наклона кривых. С уменьшением напряженности магнитного поля перегиб становится более отчетливым и его протяженность возрастает. И в этом случае тенденция сохраняется, с увеличением напряженности магнитного поля H кривая проходит выше, т.е. область перегиба приходится на более высокие температуры. В целом, характерные изменения кривых $\sigma(T)$ и для образца с НК структурой объясняются изложенным выше предположением о влиянии магнитного поля на формирование АФМ порядка магнитными моментами атомов Mn.

Заключение

Сравнение кривых, представленных на рисунках 1 и 2, показывает, что они различаются. Главное сводится к тому, что на кривых КЗ образца образуется прогиб с минимумом, а на кривых НК образца формируется всего лишь перегиб (изменение наклона кривых). Возникает вопрос, какова причина наблюдаемых различий в характере кривых КЗ и НК образцов? Эта разница долж-

но быть обусловлена особенностями НК структуры, высокой плотностью дефектов и малыми размерами кристаллитов. Выше было сказано о высокой чувствительности АФМ порядка к совершенству кристаллической структуры [6]. Более того, в работе [9] показано, что в диспрозии с НК структурой геликоидальный антиферромагнитный порядок вовсе не образуется, уступая место более простому и устойчивому ФМ порядку. В исследуемом сплаве Ni_3Mn с НК структурой АФМ порядок, хотя и возникает, но обладает меньшей устойчивостью к воздействию магнитного поля и температуры, чем в сплаве с КЗ структурой, что и приводит к наблюдаемым изменениям формы кривых температурной зависимости намагниченности.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации по поддержке ведущих научных школ (Грант «Ведущие научные школы» № НШ-209.2003.8)

Литература

1. Birringer R., Herr U., and Gleiter H. Trans. Jap. Inst. Metals. Suppl. **27**, 43 (1986).
2. Gusev, A.I., Nanokristallicheskie materialy, metody polucheniya i svoistva (Nanocrystalline Materials, Preparation Techniques and Properties). // Ekaterinburg: Ural. Otdelenie, Ross. Akad. Nauk, 1998. 200 p. (in Russian)
3. Mulyukov, R. R. and Starostenkov, M. D. Acta Materialia Sinica. **13**, 301 (2000)
4. Korznikova G.F. Mulyukov Kh.Ya. Sharipov I.Z. Syutina L.A. JMMM. **203**, 178 (1999)
5. Mulyukov Kh.Ya. Korznikova G.F. Nikitin S.A. J. Appl. Phys. **79** (11), 8584 (1996).
6. Mulyukov Kh.Ya. Korznikova G.F. Sharipov I.Z. Dokl. Ross. Acad. Nauk. **351**(6), 760 (1996) (in Russian).
7. Vol'kenshtein, N.V., Zotov, T.G., Savchenkova, S.F., and Tsioukin, Yu.N., Fiz. Tverd. Tela (Leningrad). **12** (6), 1845 (1970) (in Russian).
8. Bakai, A.S. and Fateev, M.P. Metallofizika. **9**(6), 52 (1987) (in Russian).
9. Mulyukov Kh.Ya. Sharipov I.Z. Nikitin S.A. Fiz. Tverd. Tela. **38** (5), 1629 (1996) (in Russian).