

**ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ И МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
НА ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД В СОСТОЯНИЕ ТИПА  
СПИНОВОГО СТЕКЛА В АМОΡФНЫХ СПЛАВАХ  
( $Tb_xLu_{1-x}$ ) $_7Fe_{93}$**

© А.С.Андреевко, И.В.Золотухин, С.А.Никитин,  
С.Ю.Семутников, Ю.В.Скурский

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
119899 Москва, Россия  
(Поступила в Редакцию 3 июня 1996 г.)

Исследовано влияние гидростатического давления и магнитного поля на фазовый переход в состояние типа спинового стекла в системе аморфных сплавов Tb-Lu-Fe. Установлено, что гидростатическое давление приводит к понижению температуры фазового перехода. По мере увеличения давления максимум на кривой температурной зависимости магнитной восприимчивости, сопровождающий переход, сглаживается и при определенном давлении исчезает. Показано, что внешнее постоянное магнитное поле также приводит к исчезновению фазового перехода.

В аморфных сплавах редкоземельных металлов (РЗМ) с 3d-переходными металлами при понижении температуры наблюдается состояние типа спинового стекла (spin glass — SG), которое характеризуется резким увеличением коэрцитивной силы, появлением температурного гистерезиса намагниченности и максимумом на кривой температурной зависимости магнитной восприимчивости  $\chi(T)$  [1]. Причиной возникновения состояния SG принято считать наличие конкурирующих обменных взаимодействий и случайной магнитной анизотропии в аморфных сплавах на основе РЗМ. В зависимости от соотношения между энергией случайной магнитной анизотропии и энергией обменных взаимодействий может существенным образом изменяться температура перехода в состояние SG [2]. Наиболее полно изучены сплавы, в которых либо обменные взаимодействия существенно превышают случайную магнитную анизотропию (слабо анизотропный предел), либо — наоборот (сильно анизотропный предел) [3,4].

В настоящей работе проведены исследования с целью изучения зависимости температуры перехода в SG от гидростатического давления и магнитного поля в системе аморфных сплавов  $(Tb_xLu_{1-x})_7Fe_{93}$ , ( $x = 0 \div 1$ ). Выбор системы определялся из следующих соображений. Тербий является металлом с огромной магнитной анизотропией [5]. Замещение его паулиевским парамагнетиком — лютецием приводит к уменьшению магнитной анизотропии сплава, практически не влияя на

обменные взаимодействия, которые в основном определяются обменными интегралами внутри магнитной подсистемы железа. Концентрация железа выбрана с учетом того, что в магнитной подсистеме железа в аморфных и кристаллических соединениях РЗМ-Fe сосуществуют конкурирующие обменные взаимодействия: за счет косвенного обмена через электроны проводимости, и вследствие перекрытия волновых функций ближайших соседей [6,7]. При больших концентрациях железа второй вклад существенно возрастает и становится сравнимым с первым. Поскольку оба вида обменных взаимодействий по-разному зависят от межатомных расстояний [8], то наложение внешнего гидростатического давления должно приводить к перенормировке отношения между ферро- и антиферромагнитными обменными взаимодействиями, что должно проявиться в изменении температуры и характера фазового перехода в состояние SG.

## 1. Методики измерений и образцы

Основные исследования были проведены на установке для измерения магнитной восприимчивости  $\chi$  при действии высокого гидростатического давления. Установка позволила проводить исследования  $\chi$  в присутствии переменного поля до 5 Oe частотой 20–200 Hz и постоянного поля до 15 kOe при давлениях до  $10^{10}$  dyn/cm<sup>2</sup> в области температур от 80 до 32 K. Подробное описание устройства данной установки можно найти в [9]. Измерения намагниченности в полях до 15 kOe и интервале температур 4.2–300 K проводились на вибрационном магнитометре.

Аморфные сплавы  $(Tb_xLu_{1-x})_7Fe_{93}$  ( $x = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ ) были получены методом ионно-плазменного напыления на охлаждаемую жидким азотом алюминиевую фольгу и имели толщину 15  $\mu$ m. Образцы были рентгеновски аморфными при комнатных температурах.

## 2. Экспериментальные результаты

Исследуемые сплавы, как показали измерения температурных и полевых зависимостей намагниченности, были магнитоупорядочены при температурах ниже комнатной. Измерения полевых зависимостей намагниченности подтверждают этот вывод. Для всех сплавов были проведены измерения намагниченности вплоть до температуры  $T = 320$  K, и методом термодинамических коэффициентов [10] проведен расчет температурного хода спонтанной намагниченности. Значения температур Кюри сплавов находятся в пределах 330–360 K и возрастают с ростом содержания тербия.

На рис. 1 представлены температурные зависимости намагниченности сплава  $Lu_7Fe_{93}$ , измеренные в различных магнитных полях ниже температуры Кюри. Из рисунка видно, что при охлаждении намагниченность резко уменьшается при температурах ниже 50–90 K. Кривая температурной зависимости намагниченности  $\sigma(T)$  имеет максимумы в области температур 40–80 K, которые смещаются в сторону низких температур при увеличении магнитного поля. Следует отметить, что все измерения намагниченности проводились в режиме предварительного охлаждения образца в нулевом магнитном поле с последующим отогревом в поле измерения. Из рис. 1 видно, что кривые намагниченности имеют вид, достаточно типичный для редкоземельных аморфных

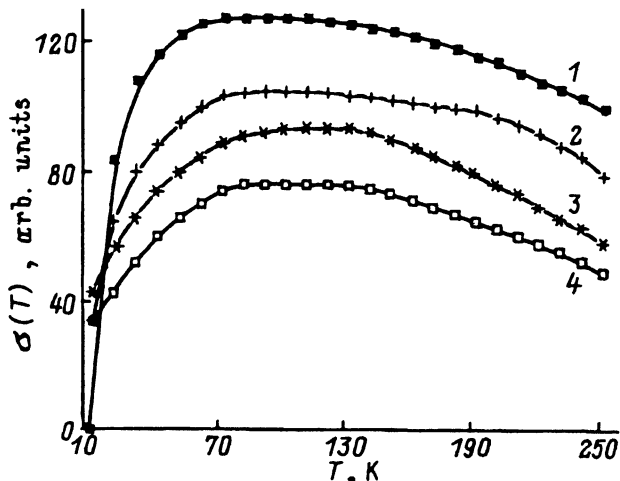


Рис. 1. Зависимость намагниченности  $\sigma$  от температуры для аморфного сплава  $\text{Lu}_7\text{Fe}_{93}$ .  
 $H$  (кОе): 1 — 15, 2 — 11, 3 — 5, 4 — 1.

сплавов [11]. Характер максимумов на кривых и резкое уменьшение намагниченности при низких температурах свидетельствуют о наличии перехода в состояния SG.

На рис. 2 представлены температурные зависимости магнитной восприимчивости при атмосферном давлении для двух сплавов исследуемой системы, измеренные при одинаковой скорости нагрева образцов (2 K/min). Из рисунка видно, что с увеличением содержания тербия максимумы  $\chi(T)$ , соответствующие переходу в состояние SG смещаются в сторону более высоких температур и становятся более резкими.

Измерения влияния гидростатического давления на магнитную восприимчивость сплавов (рис. 3) показали, что при увеличении давления максимумы на кривых  $\chi(T)$  смещаются в сторону более низких температур и становятся менее отчетливыми. Более того, обнаружены критические давления (для сплава  $(\text{Lu}_{0.8}\text{Tb}_{0.2})_7\text{Fe}_{93}$   $P_{\text{cr}} \approx 9 \cdot 10^9 \text{ dyn/cm}^2$ , для сплава  $\text{Lu}_7\text{Fe}_{93}$  —  $P_{\text{cr}} \approx 6 \cdot 10^9 \text{ dyn/cm}^2$ ), при которых максимумы

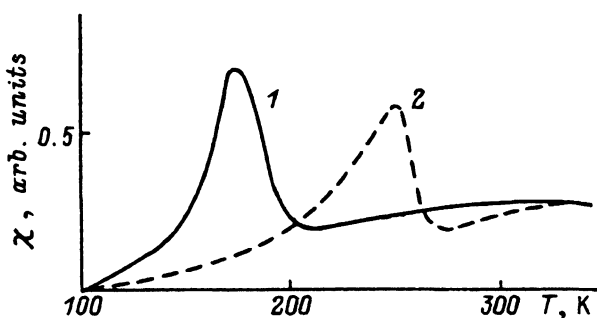


Рис. 2. Зависимости начальной восприимчивости от температуры.  
 1 —  $(\text{Lu}_{0.8}\text{Tb}_{0.2})_7\text{Fe}_{93}$ , 2 —  $(\text{Lu}_{0.2}\text{Tb}_{0.8})_7\text{Fe}_{93}$ .

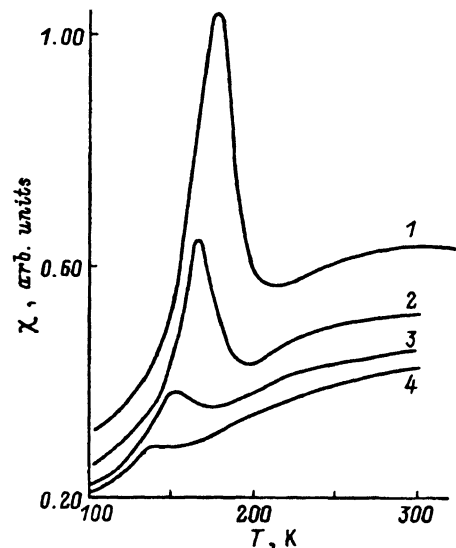


Рис. 3. Температурная зависимость магнитной восприимчивости для различных величин гидростатического давления аморфного сплава  $(Lu_{0.8}Tb_{0.2})_7Fe_{93}$ .

$P$  ( $10^9$  dyn/cm<sup>2</sup>): 1 — 1, 2 — 3, 3 — 6, 4 — 9.

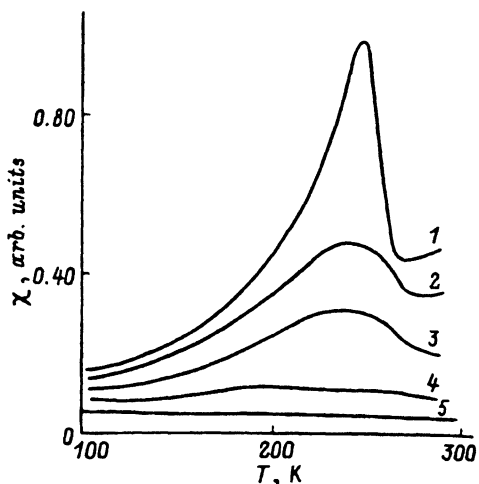


Рис. 4. Температурная зависимость магнитной восприимчивости для различных значений внешнего постоянного магнитного поля для сплава  $(Lu_{0.2}Tb_{0.8})_7Fe_{93}$ .

$H$  (Oe): 1 — 0, 2 — 20, 3 — 50, 4 — 200, 5 — 2000.

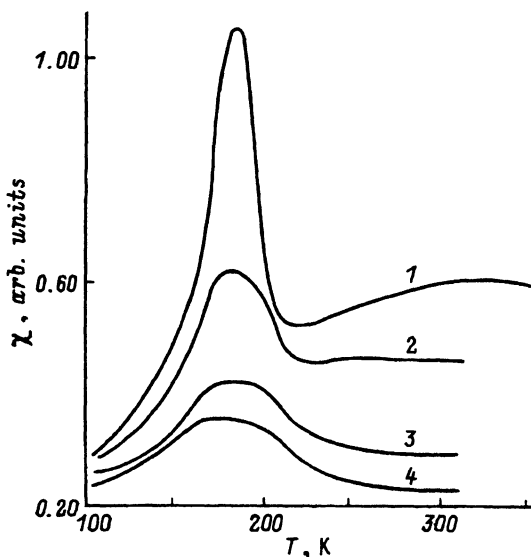


Рис. 5. Температурная зависимость магнитной восприимчивости для различных значений внешнего магнитного поля для сплава  $(Lu_{0.8}Tb_{0.2})_7Fe_{93}$ .

$H$  (Oe): 1 — 0, 2 — 25, 3 — 50, 4 — 75.

исчезают. Для сплава  $(\text{Lu}_{0.2}\text{Tb}_{0.8})_7\text{Fe}_{93}$   $P_{\text{сг}}$  больше, чем используемые в эксперименте давления, однако общая тенденция к подавлению фазового перехода сохраняется и в этом образце. Таким образом, можно заключить, что увеличение давления приводит к уменьшению температуры перехода в состояние SG, его постепенному «размытию» и последующему исчезновению. С увеличением тербия критические давления, при которых исчезает пик на кривой температурной зависимости магнитной восприимчивости, увеличиваются.

На рис. 4 и рис. 5 представлены температурные зависимости магнитной восприимчивости для сплавов  $(\text{Lu}_{0.2}\text{Tb}_{0.8})_7\text{Fe}_{93}$  и  $(\text{Lu}_{0.8}\text{Tb}_{0.2})_7\text{Fe}_{93}$  измеренные в присутствии постоянного подмагничивающего поля. Измерения проводились при той же скорости температурного сканирования. Из рисунков видно, что внешнее поле также приводит к подавлению перехода в состояние SG, причем при большем содержании тербия для этого требуется более значительная величина магнитного поля.

### 3. Обсуждение результатов

При обсуждении экспериментальных результатов рассмотрим три взаимодействия, которые, как указывалось выше, оказывают влияние на фазовый переход в состояние спинового стекла: случайную магнитную анизотропию, изменение которой в сплавах достигается замещением лутетия на сильноанизотропные ионы тербия, обменные взаимодействия, изменение которых обеспечивается внешним гидростатическим давлением, и магнитное поле.

Как уже отмечалось выше, переход в состояние SG вызывается наличием конкурирующих обменных взаимодействий и случайной магнитной анизотропии. Как видно из экспериментальных данных (см. рис. 2), увеличение энергии магнитной анизотропии (рост содержания тербия) приводит к росту температуры перехода в состояние SG, т. е. стабилизирует это состояние.

Механизм воздействия локальных магнитокристаллических полей или случайной магнитной анизотропии на фазовый переход SG можно представить следующим образом. При охлаждении ниже температуры Кюри в аморфных сплавах РЗМ —  $3d$ -переходный металл устанавливается сперимагнитная структура, в которой магнитные моменты  $3d$ -подсистемы располагаются коллинеарно или почти коллинеарно, а магнитные моменты РЗМ вследствие случайной магнитной анизотропии заполняют полусферу, причем средний магнитный момент редкоземельной подсистемы направлен антипараллельно среднему моменту  $3d$ -подсистемы. С понижением температуры константа одноионной магнитной анизотропии увеличивается, угол раствора конуса, образуемого магнитными моментами  $f$ -ионов, увеличивается и разупорядочение возрастает как в  $f$ -, так и в  $d$ -подсистеме. При увеличении числа ионов Tb разупорядочивающее воздействие  $f$ -подсистемы на общий магнитный порядок в сплаве возрастает и переход в состояние SG происходит при более высокой температуре.

Нами установлено, что в данных сплавах наблюдаются рекордно большие температуры перехода в состояние SG (в сплаве TbSi [12] температура  $T_{\text{SG}} \approx 183$  K. В других SG эти температуры не превышают 60–100 K).

Влияние давления на температуру перехода в состояние SG в редкоземельных аморфных сплавах богатых железом было обнаружено в работе [7]. Однако обнаруженное в этой работе уменьшение температуры перехода с давлением в состояние SG не обсуждалось. Если принять за основу предложенную в них модель, то можно предположить, что увеличение антиферромагнитного обмена внутри подсистемы железа в результате действия давления должно сопровождаться увеличением температуры перехода в состояние SG вследствие наличия конкурирующих ферро- и антиферромагнитных обменных взаимодействий.

Следовательно, необходимо принимать во внимание другие механизмы. Известно [9], что константы магнитной анизотропии редких земель уменьшаются при действии давления. Поэтому естественно предположить, что локальная магнитная анизотропия ионов тербия также уменьшается при действии давления в сплавах Tb-Lu-Fe. В результате дезориентирующее действие локальной магнитной анизотропии должно проявляться при более низкой температуре. Влияние давления на случайную анизотропию, по-видимому, также незначительно сказывается на переходе в состояние SG, поскольку эффект понижения температуры перехода с давлением наблюдается и в сплаве Lu-Fe где, ввиду отсутствия редкоземельных ионов, ее значения малы.

Из рис. 3 и рис. 4 видно, что при достижении критической величины внешнего давления пик магнитной восприимчивости  $\chi$ , соответствующий переходу в состояние SG, исчезает. Это означает, что межатомные расстояния играют определяющую роль в установлении того или иного вида магнитной структуры в аморфных сплавах.

Как следует из рис. 5 наложение внешнего магнитного поля приводит к «размытию» и исчезновению пика на кривой температурной зависимости магнитной восприимчивости. Этот эффект достаточно очевиден, поскольку внешнее магнитное поле всегда приводит к упорядочению магнитной структуры аморфных сплавов РЗМ-железо и, следовательно, приводит к разрушению состояния SG. То, что исчезновение пика на кривой  $\chi(T)$  происходит в больших полях в сплавах, содержащих Tb, свидетельствует о правильности нашего предположения, что наличие магнитной анизотропии стабилизирует состояние SG, т. е. чем выше магнитная анизотропия тем выше  $T_{SG}$ .

Таким образом, проведенные нами исследования показали, что в сплавах (Tb, Lu)<sub>7</sub>Fe<sub>93</sub> наблюдаются рекордно высокие температуры перехода в состояние SG ( $T_{SG} \approx 250$  K). Установлено, что случайная магнитная анизотропия стабилизирует состояние SG в аморфных сплавах Tb-Lu-Fe, что проявляется в возрастании  $T_{SG}$  при увеличении концентрации ионов тербия. При действии давления  $T_{SG}$  понижается вследствие уменьшения констант локальной случайной магнитной анизотропии. Анализ экспериментальных результатов показал, что фазовый переход SG подавляется при действии как давления, так и магнитного поля. Наблюдаются критические значения магнитных полей и давлений, в которых данный переход исчезает.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта № 94-02-04-656 и гранта М12300 от Международного научного фонда и Российского правительства.

## Список литературы

- [1] A.P. Murani. *J. Magn. Magn. Mater.* **5**, 1, 95 (1977).
- [2] S.K. Chatak. *Solid State Commun.* **58**, 7, 461 (1986).
- [3] E.M. Chudnovsky, W.M. Saslow, R.A. Serota. *Phys. Rev.* **B33**, 251 (1986).
- [4] M.J. Shea, K.M. Lee, A. Fert. *J. Appl. Phys.* **67**, 9, 5769 (1990).
- [5] К. Тейлор, М. Дарби. *Физика редкоземельных соединений*. Мир. М. (1974). С. 373.
- [6] S. Ishido, M. Takahashi, U. Gonser. *Proc. Int. Symp. Phys. Magnet. Mater. (ISPMM-87)*. Sendai (1987). P. 399.
- [7] A.S. Andreenko, S.A. Nikitin, Yu.I. Spichkin. *J. Magn. Magn. Mater.* **118**, 142 (1993).
- [8] А.С. Андреевко, С.А. Никитин, Ю.И. Спичкин. *Вестн. МГУ. Сер. 3, Физика, астрономия* **34**, 55 (1993).
- [9] Ю.И. Спичкин. *Канд. дис. МГУ. М.* (1993). С. 158.
- [10] К.П. Белов. *Магнитные превращения*. Физматгиз. М. (1959). С. 259.
- [11] А.С. Андреевко, А.К. Звездин, С.А. Никитин, Г.В. Сайко, С.Н. Уточкин, Д.Ю. Чешля. *ЖЭТФ* **72**, 2, 524 (1991).
- [12] J.J. Hauser. *Phys. Rev.* **B34**, 5, 3212 (1986).