

УДК 539.213.2:537.62:536.425

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ НАМАГНИЧЕННОСТИ БЫСТРОЗАКАЛЕННЫХ СПЛАВОВ Fe–Cu–Nb–Si–В

© 2021 г. Н. В. Ильин¹*, В. С. Комогорцев², Г. С. Крайнова¹, В. А. Иванов¹, И. А. Ткаченко³,
В. В. Ткачев¹, В. С. Плотников¹, Р. С. Исхаков²

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Дальневосточный федеральный университет”, Владивосток, Россия

²Институт физики имени Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук –
обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения
Федеральный исследовательский центр “Красноярский научный центр Сибирского отделения
Российской академии наук”, Красноярск, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия

*E-mail: ilin_nva@dyfu.ru

Поступила в редакцию 19.04.2021 г.

После доработки 12.05.2021 г.

Принята к публикации 28.05.2021 г.

Исследованы быстрозакаленные сплавы типа “Finemet” различного состава. На основе анализа низко- и высокотемпературной зависимостей намагниченности рассчитаны температура Кюри, постоянная Блоха, критический параметр и спонтанная намагниченность при 0 К. Установлена линейная корреляция постоянной спин-волновой жесткости и температуры Кюри.

DOI: 10.31857/S0367676521090143

ВВЕДЕНИЕ

Большой интерес представляют сплавы на основе Fe–Si–В с небольшими добавками Cu и Nb, полученные методом быстрой закалки из жидкого состояния, и получившие название фанмет (Finemet). Такие сплавы, обладая аморфно-нанокристаллической структурой, по ряду служебных свойств могут превосходить как аморфные, так и нанокристаллические материалы [1, 2].

Широкое использование нанокристаллических и аморфных сплавов на основе Fe типа Finemet связано в первую очередь с их магнитными свойствами [1]. Знание магнитных характеристик таких материалов и их поведения при внешних воздействиях (приложении внешнего магнитного поля, повышении температуры) является актуальным при создании изделий магнитоэлектроники.

Температурная зависимость намагниченности является одной из фундаментальных характеристик ферромагнетика и определяет такие важные параметры их, как спонтанная намагниченность при 0 К $M_S(0)$, температура Кюри T_C , константа Блоха B .

Поведение намагниченности $M_S(T)$ в области низких температур рассматривается в терминах

спиновых волн и может быть описано с помощью закона Блоха [3–5]:

$$\frac{M_S(T)}{M_S(0)} = 1 - BT^{3/2} - CT^{5/2} - O(T^{7/2}). \quad (1)$$

При приближении к точке Кюри в соответствии с теорией критических

$$M_S(T) \sim (T_C - T)^\beta. \quad (2)$$

В данной работе в широком диапазоне температур было изучено поведение спонтанной намагниченности $M_S(T)$ быстрозакаленных сплавов Fe–Cu–Nb–Si–В девяти различных композиций (табл. 1), полученных методом спиннингования, которые можно рассматривать в качестве прекурсоров для нанокристаллических магнитомягких сплавов [1].

ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследование намагниченности было проведено в интервале температур от 4 до 975 К (до температур, превышающих температуру Кюри данных быстрозакаленных сплавов [6, 7]) с использованием SQUID магнитометра MPMS 7XL Quantum De-

Таблица 1. Магнитные параметры сплавов Fe–Cu–Nb–Si–B

Состав	B , $10^{-5} \text{ K}^{-3/2}$	C , $10^{-8} \text{ K}^{-5/2}$	T_C , К	β	$M_S(0)$, Гс	D , мэВ · Å ²	A , 10^{-7} эрг · см ⁻¹
Fe ₇₀ Cu ₁ Nb ₃ Si ₁₃ B ₁₃	1.55	2.64	657	0.380	725	187	5.59
Fe _{71.5} Cu ₁ Nb ₅ Si _{16.5} B ₆	2.65	8.68	562	0.389	1006	92	3.79
Fe ₇₃ Cu _{1.5} Nb ₃ Si _{16.5} B ₆	1.63	3.41	612	0.378	943	152	5.90
Fe _{73.5} Cu ₁ Nb ₃ Si _{13.5} B ₉	1.66	—	617	—	950	150	5.85
Fe ₇₄ Cu ₁ Nb ₃ Si ₁₆ B ₆	1.33	2.87	628	0.364	1092	158	7.10
Fe _{74.3} Cu _{0.2} Nb ₃ Si _{16.5} B ₆	1.64	3.09	615	0.375	1034	143	6.07
Fe ₇₇ Cu ₁ Nb ₃ Si ₁₃ B ₆	1.35	4.58	627	0.405	1087	168	7.51
Fe _{77.5} Cu _{0.5} Nb ₃ Si _{8.5} B _{10.5}	1.73	4.13	584	0.423	1159	128	6.09
Fe ₇₇ Cu ₁ Si ₁₆ Nb ₆	0.99	2.31	733	0.456	1034	200	8.50
3D Heisenberg [10]				0.365			

sign и вибрационного магнетометра. Структура торцов была изучена с применением растрового электронного микроскопа Carl Zeiss Ultra 55+.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Температурная зависимость спонтанной намагниченности сплавов Fe–Cu–Nb–Si–B в диапазоне температур от 4 до 975 К представлена на рис. 1. Данная зависимость позволяет экспериментально определить температуру Кюри аморфного состояния исследованных сплавов, $T_C^{\text{ам}} \sim 600$ К. Появление спонтанной намагниченности при дальнейшем повышении температуры, например для образцов Fe₇₃Cu_{1.5}Nb₃Si_{16.5}B₆, Fe₇₄Cu₁Nb₃Si₁₆B₆ (рис. 1) связано с началом многоступенчатого перехода в нанокристаллическое состояние [7]. Для Fe₇₇Cu₁Si₁₆B₆ $T_C^{\text{ам}}$ экспериментально не установлена, так как переход данного сплава в равновесное состояние происходит начиная с температур ниже критической температуры фазового перехода ферромагнетик-парамагнетик.

Для аморфных сплавов выражение (1) может быть использовано до температур порядка $\sim 0.5T_C$ [8, 9]. Вследствие этого в диапазоне температур от 4 до 250–300 К по зависимости $M_S(T)/M_S(0) = f(T)$ (рис. 2а, 2в, 2д, 2ж) в соответствии с (1) рассчитаны константы Блоха B (табл. 1).

При приближении к T_C зависимости $M_S(T)/M_S(0) = f(T)$ для исследованных спиннингованных лент на основе Fe (рис. 2б, 2з, 2е, 2з) позволяют определить в соответствии с уравнением (2) критические параметры β сплавов (табл. 1). Рассчитанные значения критического параметра близки к теоретическим ($\beta = 0.365$) [10], что дает возможность с магнитной точки зрения рассматривать быстрозакаленные сплавы Fe–Cu–Nb–Si–B в виде гомогенного трехмерного гейзенберговского ферромагнетика.

Величину константы Блоха можно выразить через спин-волновую жесткость D ферромагнитных сплавов [3]:

$$B = \frac{g\mu_B}{M_S(0)} \left(\frac{k}{4\pi D} \right)^{3/2} \zeta(3/2), \quad (3)$$

где $g = 2.1$ — множитель Ланде для сплавов на основе железа, $M_S(0)$ — намагниченность насыщения при 0 К, $\zeta(3/2) = 2.612$ — дзета функция Римана.

Используя экспериментальные данные, полученные в работе [11] по исследованию быстрозакаленных сплавов Fe–Cu–Nb–Si–B методом ферромагнитного резонанса, были рассчитаны значения намагниченности насыщения при комнатной температуре, и в данной работе отнормированы до значения спонтанной намагниченности $M_S(0)$ (табл. 1).

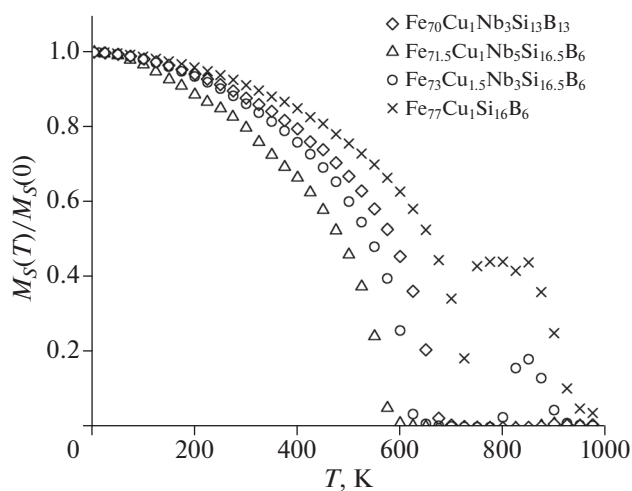


Рис. 1. Температурная зависимость приведенной намагниченности сплавов Fe–Cu–Nb–Si–B.

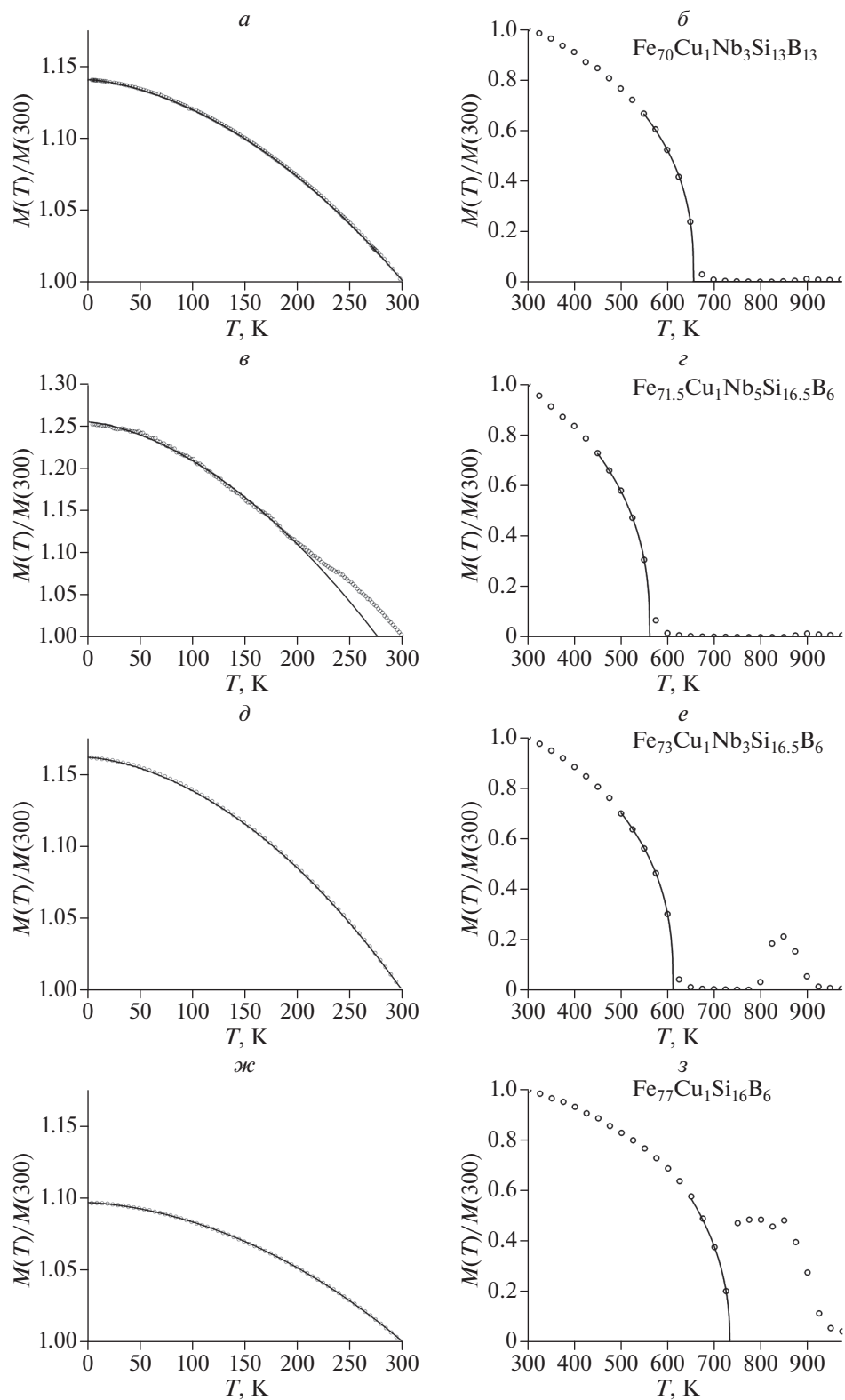


Рис. 2. Аппроксимация экспериментальных данных законом Блоха (1) (*а, в, д, ж*) и уравнением критических явлений (2) (*б, г, е, з*).

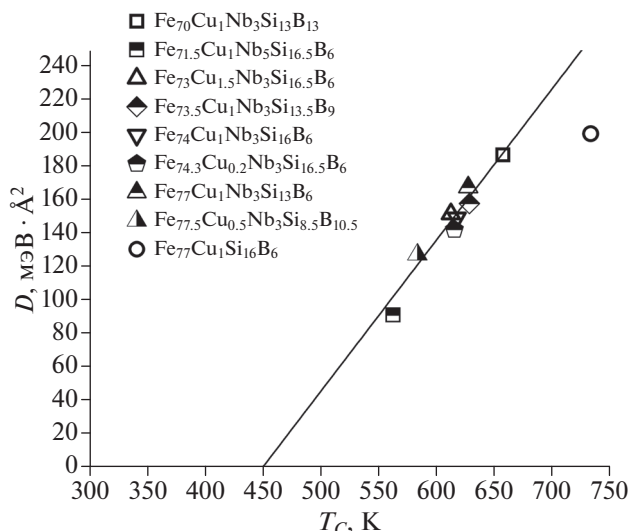


Рис. 3. Спин-волновая жесткость D в зависимости от температуры Кюри T_C сплавов Fe–Cu–Nb–Si–B.

Спин-волновая жесткость D непосредственно связана с константой обменной жесткости A [3, 5] выражением:

$$A = \frac{DM_S(0)}{2g\mu_B} \quad (4)$$

Полученные значения параметров T_C , D и A для сплавов Fe–Cu–Nb–Si–B различного состава представлены в табл. 1.

На рис. 3 показана корреляция спин-волновой жесткости и температуры Кюри для рассмотренных в работе быстрозакаленных сплавов на основе железа. Данная зависимость $D = f(T_C)$ аппроксимирована нами линейным уравнением:

$$D[\text{мЭВ} \cdot \text{Å}^2] = 0.9T_C[\text{K}] - 406. \quad (5)$$

Следует обратить внимание на значения D и T_C для образца $\text{Fe}_{77}\text{Cu}_1\text{Si}_{16}\text{B}_6$, выпадающие из общего тренда, который демонстрирует наличие в аморфной матрице кристаллической фазы уже в исходном, не отожженном, состоянии (рис. 4), что позволяет считать данный сплав частично закристаллизованным.

Для классического ферромагнетика связь спин-волновой жесткости и температуры Кюри в рамках теории локализованного магнетизма можно представить зависимостью [5]:

$$D \sim Ja^2 = \text{Const} T_C, \quad (6)$$

где J – обменный интеграл, a – постоянная решетки. Таким образом, константа спин-волновой жесткости должна обращаться в нуль при нулевой температуре Кюри. В представленном исследовании аморфных ферромагнитных сплавов Fe–Cu–Nb–Si–B константа D демонстрирует необычную линейную корреляцию с температурой Кюри и предсказывающую нулевое значение D при ненулевом значении температуры Кюри $T_C = 451$ К.

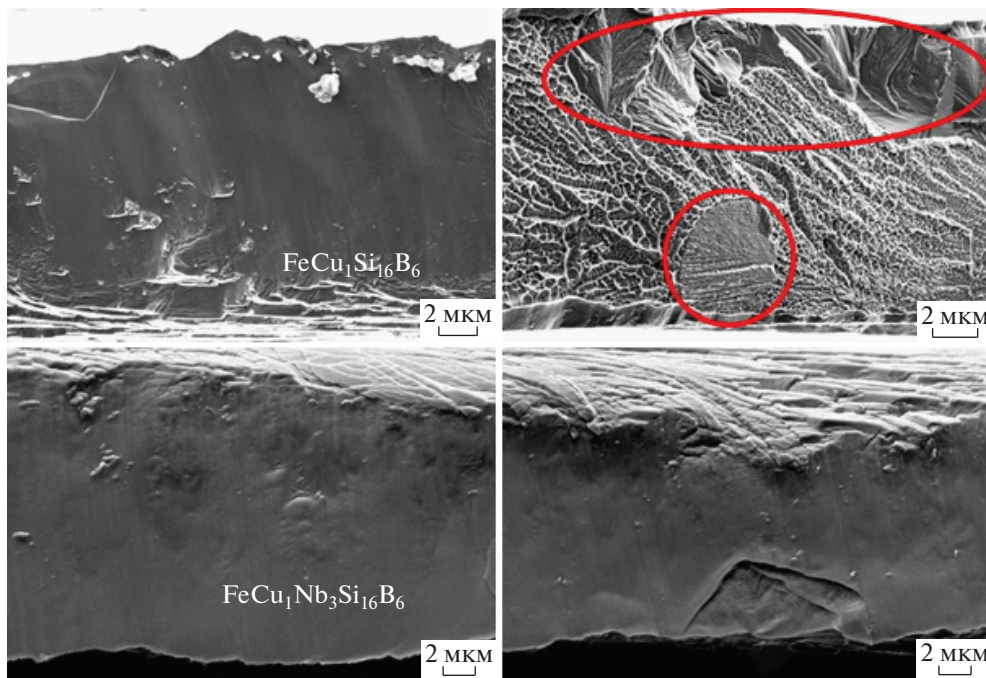


Рис. 4. Электронно-микроскопические изображения торцов сплавов Fe–Cu–Nb–Si–B. Красным выделены области с характерным разрушением, соответствующим кристаллической структуре.

ВЫВОДЫ

В результате исследования поведения намагниченности быстрозакаленных сплавов Fe–Cu–Nb–Si–B при изменении температуры установлена линейная зависимость спин-волновой жесткости от температуры Кюри, что позволяет предсказать значение константы обменной жесткости – параметра, необходимого для микромагнитного моделирования и микромагнитных расчетов.

Полученная линейная корреляция D и T_C , и выражение (5) предполагают нулевое значение спин-волновой жесткости при ненулевом конечном значении температуры Кюри. Такая зависимость $D = f(T_C)$ указывает на сложный характер ферромагнитного упорядочения в аморфных сплавах.

Полученное значение критического параметра β для большинства изученных быстрозакаленных сплавов Fe–Cu–Nb–Si–B близко к теоретически рассчитанному значению для трехмерного однородного гейзенберговского ферромагнетика, что указывает на возможность использования данной модели для исследованных сплавов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-32-90182). Работа выполнена при финансовой поддержке госу-

дарственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 0657-2020-0005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Herzer G. // Acta Mater. 2013. V. 61. No. 3. P. 718.
2. Глезер А.М., Шурыгина Н.А. Аморфно-нанокристаллические сплавы. М.: Физматлит, 2013. 450 с.
3. Keffer F. Spin waves. V. 4/18/2. Berlin, Heidelberg: Springer, 1966. P. 1.
4. Stöhr J., Siegmann H.C. Magnetism. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. 821 p.
5. Kittel C. Introduction to solid state physics. New York: Wiley, 2004. 704 p.
6. Ильин Н.В., Ткачев В.В., Федорец А.Н. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 7. С. 951; Ilin N. V., Tkachev V.V., Fedorets A.N. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. No. 7. P. 860.
7. Ильин Н.В., Цесарская А.К., Ткачев В.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 3. С. 415; Ilin N. V., Tsesarskiya A.K., Tkachev V.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 3. P. 387.
8. Hüller K. // J. Magn. Magn. Mater. 1986. V. 61. No. 3. P. 347.
9. Luborsky F.E., Frischmann P.G., Johnson L.A. // J. Magn. Magn. Mater. 1980. V. 15–18. P. 1351.
10. Kaul S.N., Mohan C.V. // Phys. Rev. B. 1994. V. 50. No. 9. Art. No. 6157.
11. Komogortsev S.V., Krainova G.S., Ilin N.V. et al. // Inorg. Mater. Appl. Res. 2020. V. 11. No. 1. P. 177.

Study of the temperature dependence of the magnetization of rapidly quenched Fe–Cu–Nb–Si–B alloys

N. V. Ilin^{a,*}, S. V. Komogortsev^b, G. S. Kraynova^a, V. A. Ivanov^a, I. A. Tkachenko^c,
V. V. Tkachev^a, V. S. Plotnikov^a, R. S. Iskhakov^b

^aFar Eastern Federal University, Vladivostok, 690091 Russia

^bKirensky Institute of Physics, Krasnoyarsk Scientific Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, 660036 Russia

^cInstitute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 690022 Russia

*e-mail: ilin_nva@dyfu.ru

The research of rapidly quenched Finemet-type alloys of various compositions was carried out. The Curie temperature, Bloch constant, critical exponent, spontaneous magnetization at 0 K $M_S(0)$ were calculated using low- and high-temperature dependence of magnetization. A linear correlation between the spin-wave stiffness constant and the Curie temperature was established.