

06

Структура и свойства магнитомягкого легированного сплава 2НСР, подвергнутого кратковременному отжигу

© А.П. Семин¹, В.Е. Громов¹, Ю.Ф. Иванов², В.В. Соснин³, П.С. Могильников³,
И.Д. Селиванов¹, И.Ю. Литовченко⁴, Б.А. Корниенков³

¹ Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

² Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

³ Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина, Москва, Россия

⁴ Институт физики прочности и материаловедения, Томск, Россия

E-mail: syomin53@bk.com, gromov@physics.sibsib.ru

Поступило в Редакцию 28 марта 2025 г.

В окончательной редакции 12 мая 2025 г.

Принято к публикации 14 мая 2025 г.

Аморфные сплавы на основе железа при определенных режимах термомангнитной обработки в поле упругих напряжений (ТУО) характеризуются устойчивой тенденцией к росту намагниченности насыщения. В исследованном магнитомягком сплаве 2НСР с небольшими добавками Nb (~ 0.8 at.%) и Cu (~ 0.3 at.%) обнаружен рост намагниченности $\sim 15\%$ после ТУО при 540°C в течение 5 min и $\sim 20\%$ после ТУО при 540°C в течение 7 min. Подобное изменение может быть связано с состоянием аморфной структуры на стадии предкристаллизации и с появлением наноразмерных выделений кристаллической фазы и областей с упорядоченным расположением атомов.

Ключевые слова: аморфные сплавы, термомангнитная обработка, намагниченность, упругая нагрузка, электронная микроскопия.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.15.60807.20328

За последнее время было достигнуто заметное улучшение магнитомягких свойств аморфных сплавов, вызванное потребностью в разработке магнитомягких материалов с более высокой намагниченностью насыщения, более низкой коэрцитивной силой и высокой магнитной проницаемостью. Такое интенсивное развитие подобных материалов обусловлено тем, что их применение обеспечивает энергосбережение, высокий КПД и миниатюризацию электронно-магнитных устройств [1]. Известно, что аморфные сплавы сочетают в себе высокие гистерезисные магнитные характеристики с высокой пластичностью и относительно простой технологией производства — закалкой из расплава [2]. При исследовании магнитных свойств ряда высокоэнтропийных сплавов обнаружена перспективность разработки магнитомягких материалов, магнитными свойствами которых можно управлять путем их легирования и отжига.

Сплавы на основе железа характеризуются относительно высокими значениями индукции насыщения B_s и магнитострикции λ_s , а также весьма приемлемыми гистерезисными магнитными свойствами, но главное — низкими потерями на перемагничивание, которые в этих аморфных сплавах могут быть в 5 раз и более ниже, чем в традиционных электротехнических сталях [1].

Было установлено, что аморфные сплавы систем Fe–Ni–Si–B (типа 2НСР) при определенных режимах термомангнитной обработки в поле упругих напряжений (ТУО) имеют устойчивую тенденцию к росту намагниченности насыщения. В сплаве 2НСР с небольшими добавками Nb и Cu ($< 1\%$) было обнаружено увели-

чение намагниченности насыщения более чем на 20% при росте величины упругой нагрузки при охлаждении как в исходном состоянии, так и после термообработки [3,4]. Спектроскопия показала, что в образцах ленты после спиннингования образуются участки с различной величиной намагниченности насыщения. Можно предположить, что рост намагниченности связан с аморфным состоянием материала на стадии перекристаллизации с появлением мелкодисперсных выделений кристаллической фазы в результате распада аморфной матрицы [5]. Подобное изменение магнитных характеристик может быть обусловлено ростом эффективного магнитного поля на ядрах железа и изменением числа электронных состояний t_{2g} .

Термообработка приводит к релаксации атомных позиций в объеме материала, что снижает „рыхлость“ исходного аморфного состояния и увеличивает намагниченность [6,7]. Отмечается рост степени упорядоченности атомных и электронных систем сплава 2НСР после комбинированной термической обработки в магнитном поле и ТУО в сравнении с исходным состоянием сразу после спиннингования, что может привести к увеличению намагничивания ленты по сравнению с намагничиванием в исходном состоянии.

Целью работы является изучение магнитных свойств сплава 2НСР в исходном состоянии и после термомангнитной обработки при 540°C в течение 5 и 7 min.

В качестве материала исследования использовали сплав 2НСР следующего состава (at.%): Fe — 78,

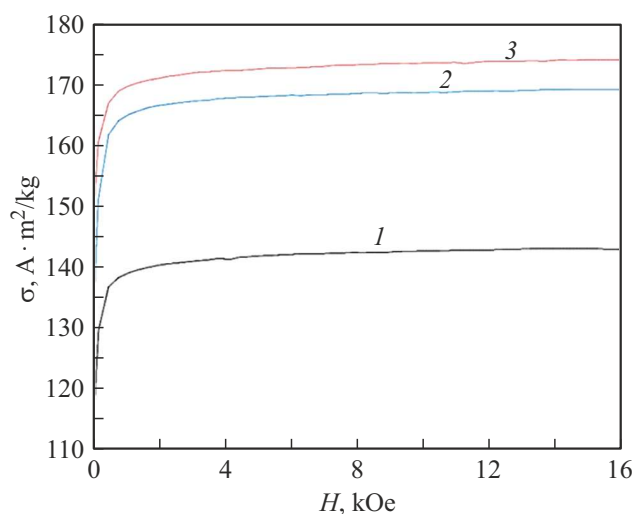


Рис. 1. Изменение намагниченности насыщения в зависимости от величины внешнего магнитного поля для образцов сплава 2НСП. 1 — исходное состояние; 2, 3 — ТУО в течение 5 и 7 min соответственно.

Ni — 1, Si — 8, В — 13, с небольшими добавками Nb (~ 0.8 at.%) и Cu (~ 0.3 at.%).

Для определения индукции насыщения был использован вибрационный магнитометр VSM-250. Кривые намагничивания, получаемые на магнитометре, представляют собой зависимости величины удельной намагниченности σ [$\text{A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$] от величины поля H [Oe]. Обработка данных вибромагнитометра производилась с помощью программного обеспечения Model DJAW2000 [8,9].

Структуру и фазовый состав ленты 2НСП исследовали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии (прибор JEOL JEM-2100F). Фольги (объекты исследования методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии) изготавливали ионным утонением (установка Ion Slicer EM-091001S, утонение осуществляется ионами аргона) пластинок, вырезанных из массивных образцов на установке Isomet Low Speed Saw перпендикулярно поверхности модифицирования, что позволяло проследить изменение структуры элементного и фазового состава материала по мере удаления от поверхности образца (поверхности покрытия).

Аморфные сплавы на основе железа при определенных режимах ТУО характеризуются устойчивой тенденцией к росту намагниченности насыщения. В работе [3] на примере сплава 2НСП, легированного Nb, при проведении ТУО образцов в поперечном магнитном поле с одновременным приложением упругой нагрузки вдоль направления магнитного поля был зафиксирован рост намагниченности насыщения более чем на 20 % (измерения проводились при температуре жидкого азота).

В настоящей работе на сплаве 2НСП с небольшими добавками Nb (~ 0.8 at.%) и Cu (~ 0.3 at.%) в результате измерения при комнатной температуре было обнаруже-

но увеличение намагниченности насыщения, достигаемое вследствие упругой нагрузки при охлаждении, что видно из данных, представленных на рис. 1. Рост намагниченности составил $\sim 15\%$ после ТУО при 540°C в течение 5 min и $\sim 20\%$ после ТУО при 540°C в течение 7 min.

Можно предположить, что подобное изменение фундаментальных характеристик, а именно аномальный рост намагниченности насыщения [4,5], связано с состоянием аморфной структуры на стадии предкристаллизации с появлением мелкодисперсных выделений кристаллической фазы в результате распада аморфной матрицы.

Приведенные на рис. 2 электронно-микроскопические изображения структуры сплава 2НСП свидетельствуют об аморфном состоянии исследуемого материала. На это однозначно указывает строение микроэлектроннограммы, содержащей два диффузных гало (рис. 2, б). Более детальное исследование структуры ленты позволило выявить вкрапления округлой формы, расположенные в структуре хаотическим образом. Малые размеры (1.5–2.5 nm) и малое содержание таких вкраплений не позволяют получить их микродифракционную картину, что могло бы позволить сделать вывод об образовании включений второй фазы и определить фазовый состав таких включений.

В отдельных случаях в структуре исследуемой ленты выявляются области размерами 1.5–3 nm, характеризующиеся упорядоченным расположением рассеивающих электронный пучок центров, что позволяет говорить о начальной стадии кристаллизации аморфного состояния материала. Согласно данным механических испытаний на машине Инстрон 5582, разрушение при одноосном растяжении носило хрупкий характер и происходило при малых степенях деформации $\sim 0.6\%$, что вполне согласуется с аморфным статусом исследуемого сплава [10–12].

В сплаве 2НСП с небольшими добавками Nb (~ 0.8 at.%) и Cu (~ 0.3 at.%) в результате измерения при комнатной температуре выявлено увеличение намагниченности насыщения, достигаемое вследствие величины упругой нагрузки при охлаждении. Показано, что аномальный рост намагниченности насыщения связан с состоянием аморфной структуры на стадии предкристаллизации с появлением наноразмерных (1.5–2.5 nm) выделений кристаллической фазы в результате распада аморфной матрицы и наноразмерных (1.5–3 nm) областей с упорядоченным расположением атомов (рис. 3, 4).

Дальнейшие исследования должны выявить влияние параметров технологии получения ленты данного состава на размеры, топологию и количество наноразмерных выделений в исходном закаленном состоянии. Необходимо исследовать влияние скорости нагрева и скорости охлаждения, величины и направления магнитного поля, размера и знака удельной нагрузки на параметры структуры и магнитные свойства аморфной ленты после обработки. Необходимо также исследовать кристаллическую структуру и кристаллографические параметры

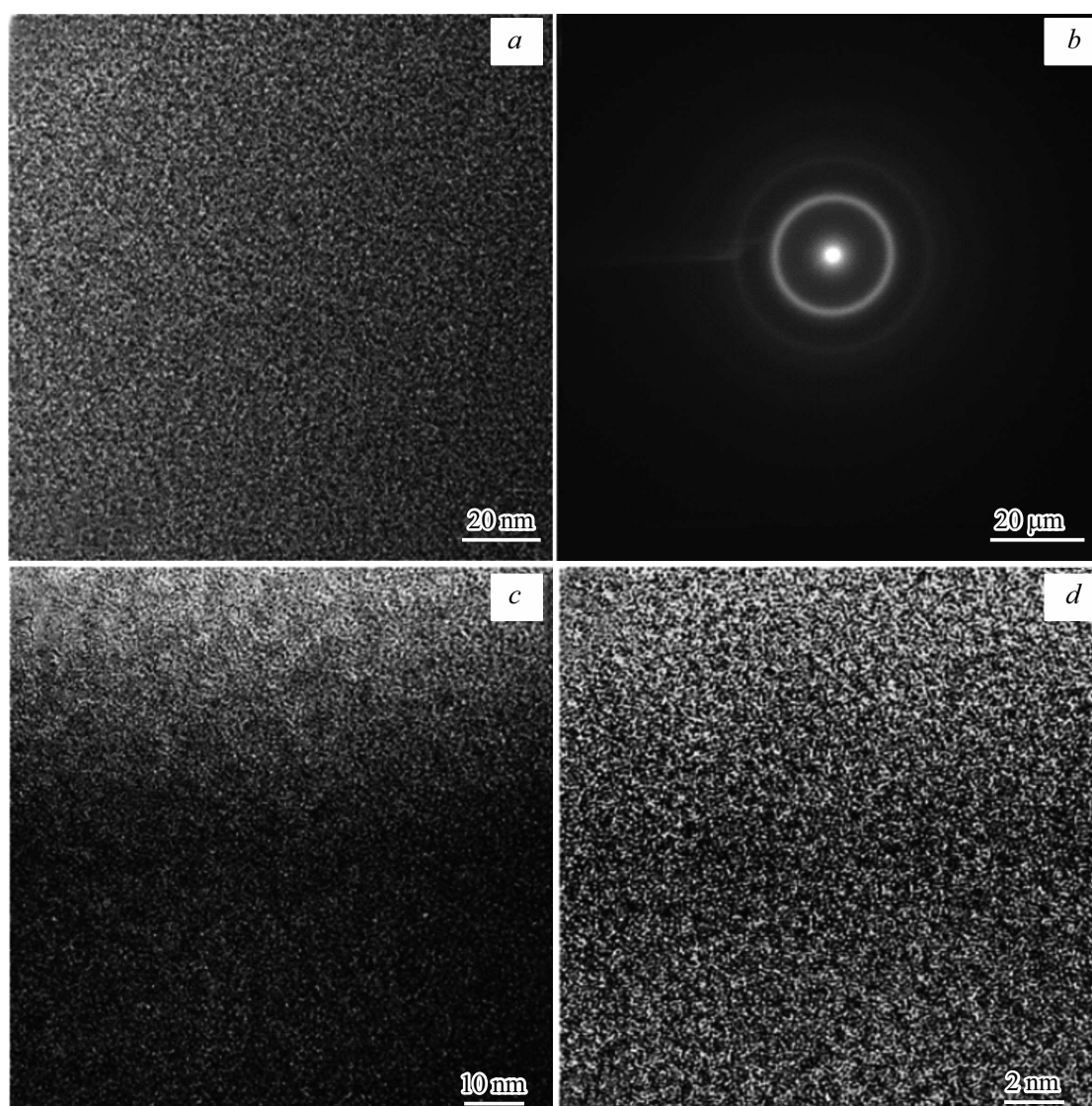


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение структуры ленты 2НСП после термомагнитной обработки при 540°С в течение 7 min. *a, c, d* — светопольные изображения, полученные при различном увеличении; *b* — микроэлектроннограмма участка, представленного на части *a*.

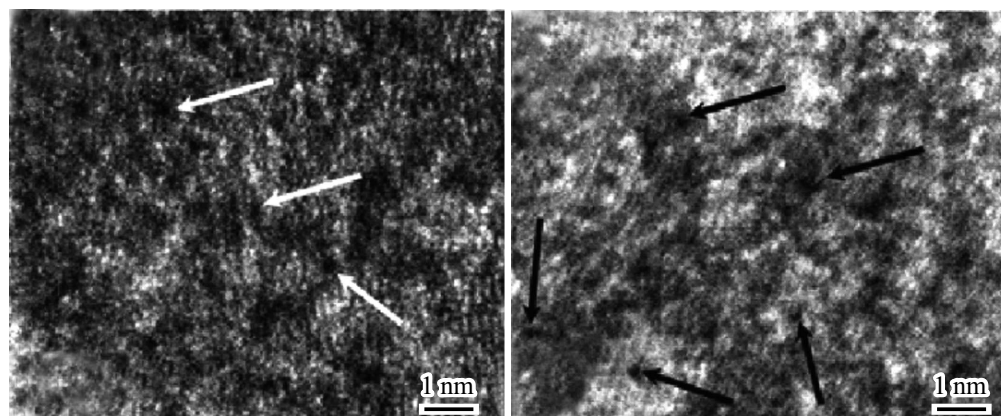


Рис. 3. Электронно-микроскопические изображения структуры ленты 2НСП после термомагнитной обработки при 540°С в течение 7 min. Стрелками указаны частицы (предположительно) второй фазы.

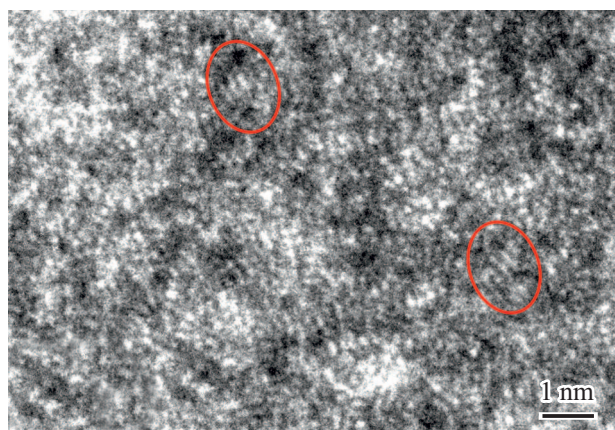


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение структуры ленты 2HCP после термомагнитной обработки при 540 °C в течение 7 min. Выделены области с квазиупорядоченным расположением рассеивающих центров.

- [9] J.W. Yeh, Y.L. Chen, S.K. Chen, *Mater. Sci. Forum*, **560**, 1 (2007). DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.560.1
- [10] А.М. Глезер, Б.В. Молотилов, *Структура и механические свойства аморфных сплавов* (Металлургия, М., 1997).
- [11] Ф.Е. Люборский, *Аморфные металлические сплавы* (Металлургия, М., 1987).
- [12] К. Судзуки, Х. Фудзимори, К. Хашимото, *Аморфные металлы* (Металлургия, М., 1987).

прекурсоров наноразмерных кластеров и их магнитные характеристики. В ближайшей перспективе планируются исследования возможности получения магнитомягких аморфных и нанокристаллических сплавов Fe–Si–B–P, Fe–Si–Nb–B, Fe–Ni–Nb–B с наноразмерными ультрадисперсными кластерами и изучение их свойств. Результаты работы могут быть использованы при создании изделий электронной техники с расширенным частотным диапазоном, высокой магнитной индукцией и низкой коэрцитивной силой.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] И.Б. Кекало, *Процессы структурной релаксации и физические свойства аморфных сплавов* (Изд. дом МИСиС, М., 2016), т. 2.
- [2] А.П. Семин, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, С.В. Панин, В.В. Соснин, П.С. Могильников, И.С. Литовченко, И.Д. Селиванов, *Проблемы черной металлургии и материаловедения*, № 4, 64 (2024). DOI: 10.52351/00260827_2024_4_64
- [3] Б.А. Корниенков, Е.Б. Артамонов, *Сталь*, № 6, 69 (2009).
- [4] Б.А. Корниенков, М.А. Либман, Б.В. Молотилов, Д.И. Кадышев, *Сталь*, № 3, 90 (2015).
- [5] В.В. Вавилова, В.П. Корнеев, Б.А. Корниенков, М.А. Либман, Б.В. Молотилов, Д.И. Кадышев, *Сталь*, № 8, 72 (2016).
- [6] E. Matsubara, S. Sato, M. Imafuku, T. Nakamura, H. Koshiba, A. Inoue, Y. Waseda, *Mater. Sci. Eng. A*, **312**, 136 (2001). DOI: 10.1016/S0921-5093(00)01903-1
- [7] W. Yang, H. Liu, Y. Zhao, A. Inoue, K. Jiang, J. Huo, H. Ling, Q. Li, B. Shen, *Mech. Sci. Rep.*, **4**, 6233 (2014). DOI: 10.1038/srep06233
- [8] R.E. Hummel, *Understanding materials science: history, properties, applications* (Springer, N.Y., 1998).