

УДК 53.098:519.674

ФРАКТАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ СПЛАВОВ $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$ В МОДЕЛИ ФРАКТАЛЬНОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

© 2024 г. С. А. Михеев^а, Е. М. Семенова^а, Ю. Г. Пастушенков^а,
В. П. Цветков^а, И. В. Цветков^{а, *}

^аТверской государственный университет, Тверь, 170100 Россия

*e-mail: mansi@mail.ru

Поступила в редакцию 15.07.2023 г.

После доработки 25.09.2023г.

Принята к публикации 25.09.2023г.

В работе проведено исследование фрактальных свойств поверхности сплавов $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$ в широком интервале концентраций x ($x = 20\text{--}90$) в рамках модели фрактальной термодинамики. Для этого нами проведен анализ изображений, полученных методом растровой электронной микроскопии, поверхностей серий сплавов $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$, синтезированных методом индукционной плавки. Показана высокая степень близости структуры поверхности всех исследованных образцов как до травления, так и после, к фракталам. Значения параметра δ , характеризующего относительное уклонение исследуемых образцов от фрактала заключены в интервале 0.017–0.029. Построены трехмерные диаграммы фрактальных параметров S_f , T_f , E_f , x и двумерные диаграммы тех же параметров, отображающие характер состояния поверхностей образцов сплавов $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$ до и после травления. Для всех исследованных образцов сплавов вычислены значения параметров фрактальных уравнений состояния. Установлена корреляция максимального значения коэрцитивной силы $H_c = 4.8$ кЭ со значениями фрактальной энтропии $S_f = 39.86$, фрактальной температуры $T_f = 529$ и фрактальной размерности $D = 2.6530$ сплавов $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$ при $x = 20$.

Ключевые слова: магнетизм, структура поверхности, фрактальная структура, фрактальное уравнение состояния.

DOI: 10.31857/S1028096024030157, EDN: HDHPBD

ВВЕДЕНИЕ

Бинарные сплавы редкоземельных металлов с железом вызывают значительный интерес исследователей как с научной, так и с практической точек зрения. Исследования фазового состава и магнитных свойств сплавов системы Nd–Fe в различных структурных состояниях позволяют более глубоко понять природу коэрцитивной силы, способствуют формированию банка данных интерметаллических соединений и построению общих моделей, описывающих свойства редкоземельных сплавов. Сплавы Nd–Fe можно рассматривать как модельные системы, их изучение дает возможность глубже понять механизмы формирования структуры и высококоэрцитивного состояния в материалах, для которых они являются базовыми, например, в постоянных магнитах Nd–Fe–B. Кроме того, применение специальных методов, например, быстрой закалки, дает возможность реализовать в сплавах Nd–Fe высокие значения коэр-

цитивной силы, что позволяет рассматривать их как перспективные функциональные материалы [1–6].

В последние годы фракталам находят широкое применение для анализа изображений морфологии и доменной структуры магнитных материалов [6–12]. В связи с этим целью настоящей работы являлось исследование фрактальных свойств поверхности сплавов $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$ в широком интервале концентраций ($x = 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 25, 20$) в рамках модели фрактальной термодинамики [10–18]. Для этого нами проведен анализ изображений, полученных методом растровой электронной микроскопии, поверхностей серий поликристаллических сплавов $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$, синтезированных методом индукционной плавки.

Фрактальная термодинамика — это направление изучения фрактальных систем, являющееся примером более общей концепции применения методов тропической математики к проблемам термодинамики различных динамических систем, предложенной и развиваемой В.П. Масловым [19].

*Элементарные сведения из теории фракталов
и определение фрактальной размерности
поверхностей сплавов $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$*

Для выработки критерия отклонения исследуемой поверхности от фракталов сформулируем конструктивное определение фрактальных множеств (фракталов), которое базируется на основных свойствах фракталов. Фракталы — это множества, которые, будучи вложенными в n -мерное евклидово пространство, могут быть покрыты элементарными фигурами этого пространства со степенной зависимостью их числа N от размеров сторон h этих фигур.

Отсюда следуют два соотношения:

$$N(h) = \Gamma h^{-D}. \quad (1a)$$

или

$$\log N(h) = \log \Gamma - D \log h. \quad (1b)$$

где D — фрактальная размерность фрактального множества; Γ — его D -мерный (фрактальный) объем. Это следует из соотношения (1a), которое можно представить в виде:

$$\Gamma = N(h)h^D. \quad (2)$$

Исследуемое множество считается фракталом, если выполнено условие $D < n$, то есть фрактальная размерность строго меньше топологической.

Соотношения (1a) и (1b) применены нами в программе Gwyddion для расчета фрактальных параметров D , Γ поверхности серии сплавов $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$. Сплавы $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$ были получены методом индукционной плавки в Научно-исследовательской лаборатории магнитных материалов Центра коллективного пользования научной аппаратурой и оборудованием Тверского государственного университета [2]. В образцах данной группы морфологию можно было наблюдать на полированных шлифах. Это связано с тем, что сами структурные составляющие образцов имеют характерный цвет, кроме того, в процессе полировки алмазными пастами и при промывке в этиловом спирте происходит процесс травления. В необходимых случаях для получения более контрастной картины морфологии применяли метод химического или электролитического травления.

Поскольку поверхности сплавов $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$ обладают трехмерными свойствами (свидетельством чего является существенное превышение фрактальной размерности значения 2), то в этой программе метод подсчета числа фигур N напрямую следует из определения фрактальной размерности (1a) и (1b), основанной на подсчете числа кубиков, покрывающих исследуемую поверхность. В основе алгоритма программы лежат следующие

шаги: кубическая решетка с постоянной решетки h накладывается на поверхность. Изначально h задается равной $L/2$ (где L — длина края поверхности), в результате получается решетка из $2 \times 2 \times 2 = 8$ кубов. Тогда $N(h)$ это число всех кубов, содержащих хотя бы один пиксель изображения. Постоянная решетки h на каждом шаге уменьшается в два раза, и процесс повторяется до тех пор, пока h не станет равной расстоянию между двумя соседними пикселями. Наклон графика зависимости $\log(N(h))$ от $\log(h)$ напрямую дает фрактальную размерность D .

На рис. 1–3 представлены изображения морфологии поверхности серии сплавов $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$ до и после кислотного травления.

Определение фрактальной размерности производили при помощи программы Gwyddion — модульной программы анализа данных, изначально предназначенной для обработки данных сканирующей зондовой микроскопии [20]. В первую очередь она предназначена для анализа высоты рельефа, полученной различными техниками сканирующей зондовой микроскопии, но в общем случае ее можно использовать для анализа любых высот или изображений. Gwyddion является свободным программным обеспечением с открытым исходным кодом, выпущенным под лицензией GNU General Public License (GNU GPL).

Соотношения (1a) и (1b) позволяют составить следующий алгоритм вычисления фрактальной размерности исследуемых множеств.

Возьмем последовательность значений h_k , $k = (1...K)$ и построим множество элементарных кубиков со сторонами h_k , покрывающими исследуемое множество. Значения h_k представим в единицах разрешения рисунка. В программе Gwyddion нами использована последовательность $h_k = 10^{0.693147k}$ ($k = 0...9$). Число полученных кубиков обозначим как N_k . Аппроксимируя зависимость N_k от h_k степенной функцией (1a) $N(h)$ найдем значения фрактальных параметров D , Γ . В дважды логарифмических координатах $\log N(h)$ и $\log h$ для близких к фрактальным объектам степенная функция будет линейной.

Степень относительного отклонения δ поверхности серии сплавов $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$ от фрактала может быть оценена по формуле:

$$\delta = \frac{1}{10} \sum_{k=1}^{10} \frac{|\log N_k - \log \Gamma + D \log h_k|}{\log N_k}. \quad (3)$$

Подробные оценки и графические иллюстрации величины δ поверхности образца $\text{Nd}_{70}\text{Fe}_{30}$ после травления приведены на рис. 4.

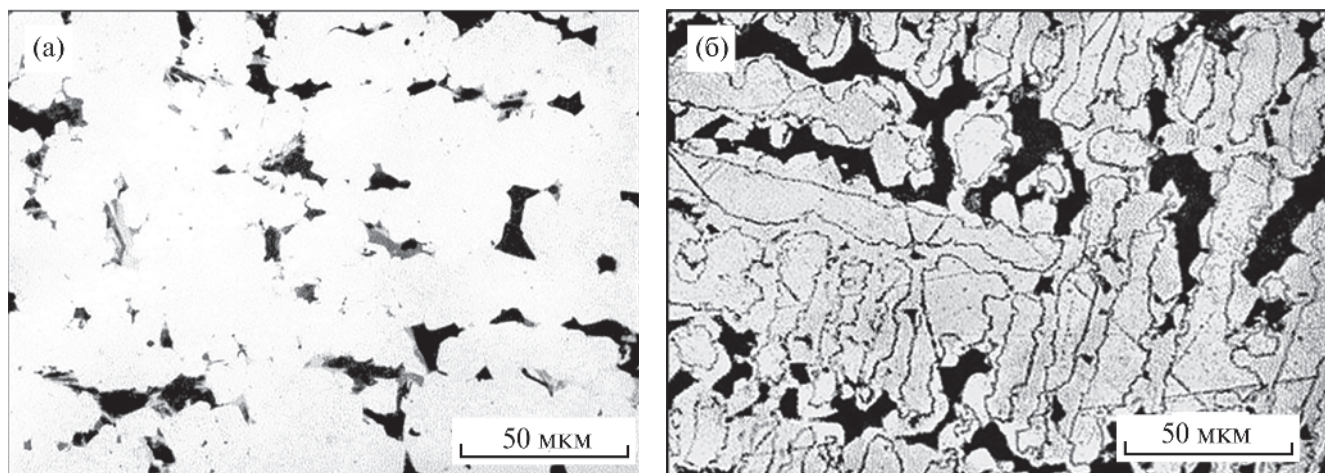


Рис. 1. Образец $\text{Nd}_{10}\text{Fe}_{90}$ до (а) и после (б) травления.

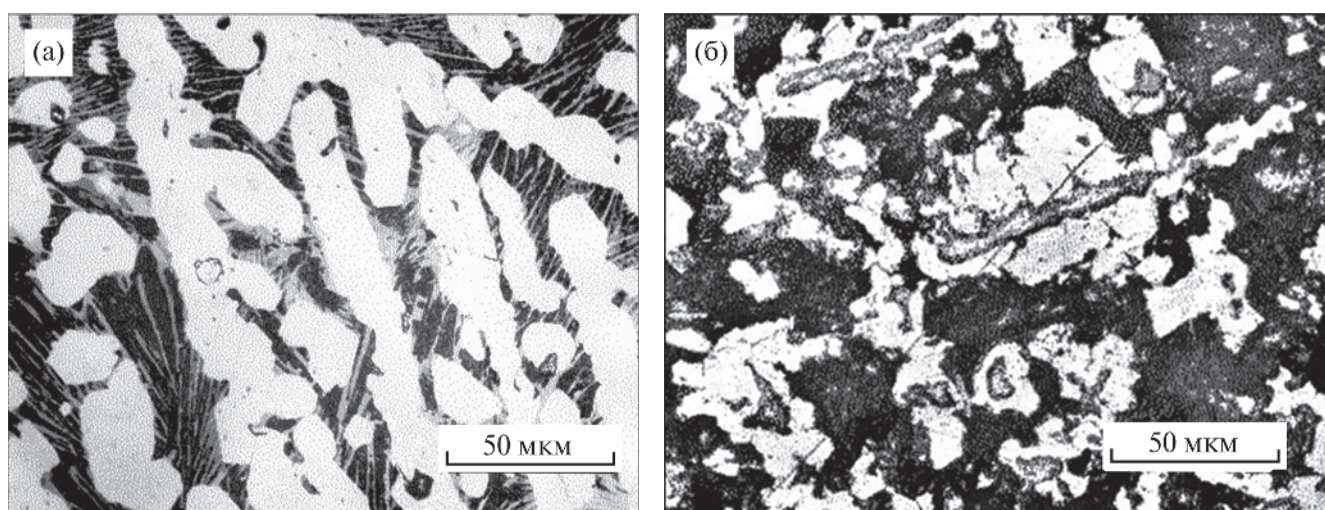


Рис. 2. Образец $\text{Nd}_{30}\text{Fe}_{70}$ до (а) и после (б) травления.

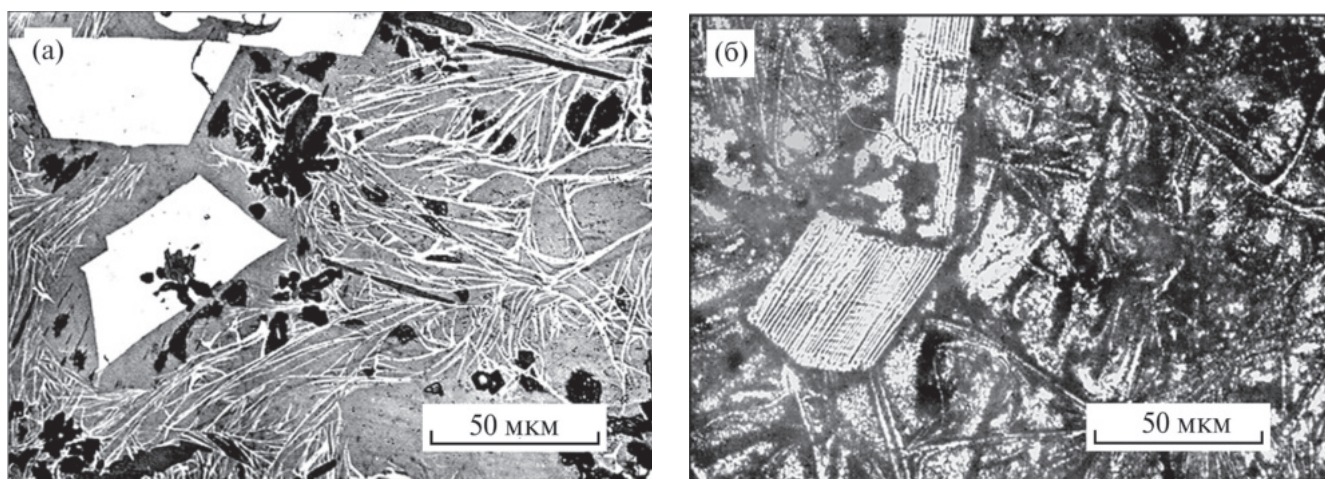


Рис. 3. Образец $\text{Nd}_{70}\text{Fe}_{30}$ до (а) и после (б) травления.

На рис. 5 приведен график зависимости степени относительного отклонения поверхности δ серии сплавов $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$ от фрактала. Из графика на рис. 6 следует, что все значения δ исследуемых образцов заключены в интервале 0.017–0.029. Из этой оценки следует высокая степень близости структуры поверхности образцов $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$, как до травления, так и после, к фракталам.

В дальнейшем мы вместо фрактального объема Γ мы будем использовать по аналогии со статистической физикой фрактальную энтропию $S_f = \ln \Gamma$ [15, 16, 18]. Для вычисления фрактальных параметров D и S_f поверхности образцов $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$ в среде компьютерной алгебры Maple [21] нами были разработаны и реализованы программы. Результаты вычислений представлены в табл. 1.

Из данных табл. 1 следует, что фрактальная размерность D поверхности кристаллов образцов $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$, до травления, составила $2.3616 \leq D \leq 2.64371$, и после травления $2.5418 \leq D \leq 2.6653$.

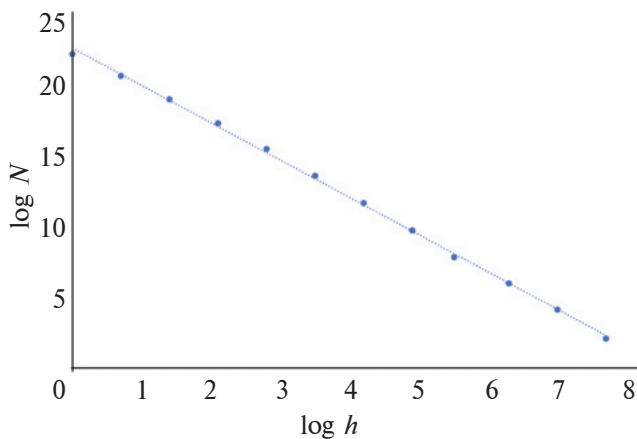


Рис. 4. Функция $N(h)$ в дважды логарифмических координатах для снимка образца $\text{Nd}_{70}\text{Fe}_{30}$ после травления.

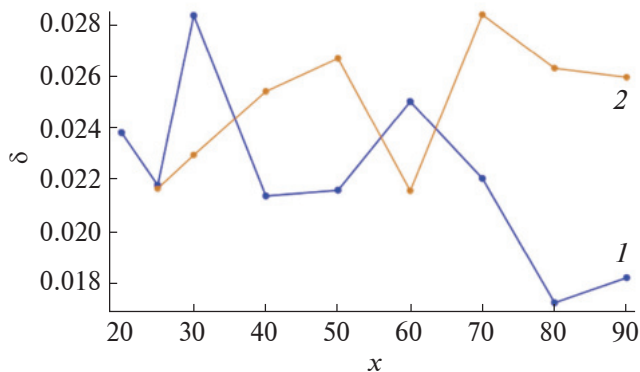


Рис. 5. График зависимости $\delta(x)$ образцов до (1) и после (2) травления.

Эти значения значительно отличаются от фрактальной размерности гладкой поверхности равной 2, что указывает на появление заметно выраженных трехмерных свойств у поверхностей образцов, как до травления, так и после.

Значения фрактальной энтропии образцов S_f заключены в пределах $36.6525 \leq S_f \leq 39.8597$ до травления и $38.7139 \leq S_f \leq 39.9085$ после травления.

Из приведенных оценок можно сделать вывод, что процесс травления приводит к увеличению как нижнего, так и верхнего пределов фрактальной размерности и фрактальной энтропии образцов.

ФРАКТАЛЬНАЯ ТЕРМОДИНАМИКА СОСТОЯНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$

Анализ динамики фрактальной структуры поверхности образцов $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$ ($x = 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 25, 20$) проведен на основе модели фрактальной термодинамики.

Кратко изложим ее основные методы и подходы.

Наряду с фрактальной энтропией S_f введем в рассмотрение фрактальную температуру T_f [17], являющуюся функцией фрактальной размерности D :

$$T_f = a \left(\frac{1}{n-D} - \frac{1}{n} \right), \quad (4)$$

где a — показатель масштаба фрактальной температуры.

Из (4) следует, что при $D = 0$ значение $T_f = 0$. Соответствие между параметрами T_f и D пред-

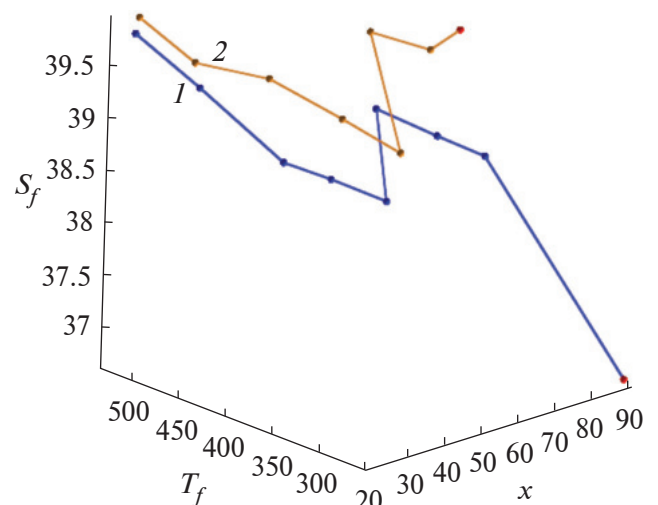


Рис. 6. Трехмерная диаграмма состояния S_f , T_f , x образцов до (1) и после (2) травления.

Таблица 1. Результат вычисления фрактальных параметров для образцов $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$ до и после травления

x	До травления			После травления		
	D	T_f	S_f	D	T_f	S_f
90	2.3616	255.2320	36.6525	2.5928	439.3049	39.3806
80	2.5294	370.8395	38.5095	2.5866	431.7835	39.3224
70	2.5424	383.3608	38.7687	2.6064	456.9652	39.5171
60	2.5676	409.7354	39.0474	2.5418	382.8000	38.7139
50	2.5150	357.7809	38.4473	2.5647	406.5059	39.0681
40	2.5370	378.0639	38.6980	2.5982	446.2008	39.4282
30	2.5492	390.2306	38.9256	2.6274	486.5354	39.5560
25	2.6098	461.4703	39.4546	2.6530	527.5177	39.9085
20	2.6437	511.9386	39.8597	—	—	—

ставлены в табл. 1. Параметры S_f и T_f представляют собой фрактальные параметры состояния поверхности образцов. Поскольку фрактальные параметры Γ и D связаны соотношением (1), то между фрактальной энтропией S_f и фрактальной температурой T_f должна быть функциональная зависимость, отражающая структуру динамической системы, описываемой данным фракталом. Характер этой зависимости и определяет фрактальное уравнение состояния (ФУС) поверхности образцов. В связи с тем, что $S_f = 0$ при $T_f = 0$, то конкретный вид ФУС выберем в виде степенной функции:

$$S_f = AT_f^\gamma. \quad (5)$$

Показатель степени γ будем называть индексом ФУС.

Наряду с S_f и T_f представляет интерес ввести фрактальный параметр состояния E_f — фрактальную энергию, которая характеризует фрактальные свойства изучаемой системы на основе соотношения:

$$dE_f = T_f^{-1} dS_f. \quad (6)$$

Подставляя (5) в (6) и интегрируя полученное выражение, имеем:

$$E_f = \frac{\gamma}{1+\gamma} T_f S_f = \frac{\gamma}{1+\gamma} AT_f^{1+\gamma}. \quad (7)$$

Коэффициент a в формуле расчета фрактальной температуры T_f (4) нами взят равным 207 из соображений приведения в соответствие фрактальной и абсолютной шкал температур. Используя данные табл. 1 и формулу (4), получаем зависимость фрактальных термодинамических параметров T_f и S_f для всех снимков, приведенных на рис. 6. Результаты представлены в табл. 2.

Из данных табл. 2 следует, что индексы ФУС γ после травления образцов уменьшаются

в 1.38 раза. Предстепенные коэффициенты A для всех образцов отличаются от их среднего значения $\bar{A} = 18.8484$ до травления не более чем на 0.079, а после травления 0.039. Проведенные нами оценки параметров ФУС A и γ показали, что степенной характер зависимости фрактальных параметров состояния поверхности образцов $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$ S_f и T_f выполняется с высокой степенью точности, порядка 10^{-3} .

Все это дает основание для успешного применения фрактальной термодинамики при анализе структуры поверхностей образцов $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЗАВИСИМОСТЕЙ ФРАКТАЛЬНЫХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ S_f И T_f

Наглядно фрактальные свойства поверхности образцов $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$ ($x = 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 25, 20$) наглядно представлены в виде диаграмм состояния, приведенной на рис. 7–9. Трехмерная диаграмма состояния (S_f, T_f, X) поверхности образцов $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$ в зависимости от состава до и после травления представлена на рис. 7. Проекция этой трехмерной диаграммы состояния S_f, T_f дают двумерные диаграммы состояния. Трехмерная диаграмма состояния E_f, T_f, x представлена на рис. 8. Проекция этой трехмерной диаграммы состояния E_f, T_f, x дают двумерные диаграммы состояния E_f, T_f (рис. 9).

Морфология, фазовый состав и магнитные свойства литых и быстрозакаленных сплавов Nd-Fe , использованных в данной работе, ранее были подробно изучены в работе [2].

Представляет несомненный интерес сравнить полученные нами результаты по исследованию фрактальных свойств поверхностей сплавов $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$ с результатами по изучению коэфици-

Таблица 2. Индексы ФУС γ и коэффициенты A для образцов $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$ до и после травления

x	До травления		После травления	
	A	γ	A	γ
90	18.7608	0.1208	23.1010	0.08766
80	18.8412		23.1018	
70	18.8921		23.1011	
60	18.8755		22.9856	
50	18.8924		23.0741	
40	18.8893		23.0974	
30	18.9278		22.9971	
25	18.8002		23.0381	
20	18.7566		—	—

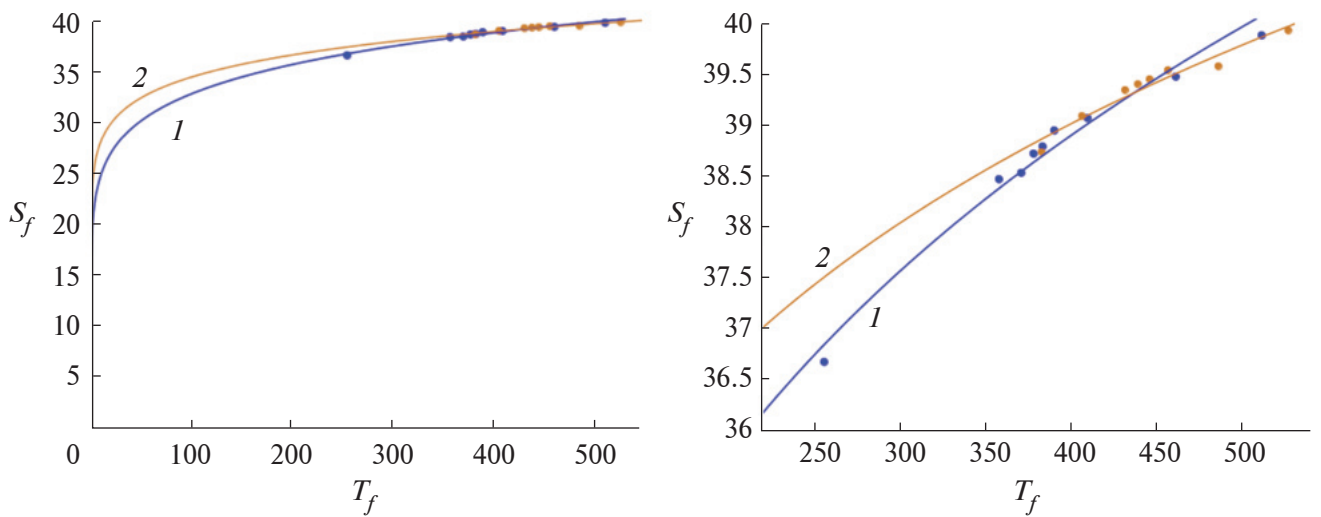


Рис. 7. Диаграммы состояния S_f , T_f образцов до (1) и после (2) травления в разных масштабах.

тивной силы H_c этих сплавов, приведенными в [2]. Они представлены на рис. 10.

Рисунки 8–10 показывают, что максимальные значения коэрцитивной силы $H_c = 4.8$ кЭ, фрактальной энтропии $S_f = 39.86$, фрактальной температуры $T_f = 529$, фрактальной размерности $D = 2.6530$ сплавов $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$ достигаются при значении $x = 20$. Что говорит о тесной связи содержания неодима в сплаве, сложности поверхности образца и его коэрцитивной силы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное нами исследование изображений поверхностей сплавов с различным составом до и после кислотного травления позволяет сформулировать следующие основные результаты.

Показана высокая степень близости структуры поверхности всех исследованных образцов как до травления, так и после, к фракталам. Значения

параметра δ , характеризующего относительное отклонение исследуемых образцов от фрактала заключены в интервале 0.017–0.029.

Было установлено, что отклонение поверхностей сплавов $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$ от фракталов составляет величину не более 3×10^{-2} . Разработанное одними из авторов настоящей статьи новое направление в исследовании свойств фракталов – “фрактальная термодинамика” [14] – позволяет выявлять принципиально новые закономерности структуры поверхностей серии сплавов $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$.

В рамках концепции фрактальной термодинамики построены трехмерные и двумерные диаграммы, отображающие характер состояния поверхностей образцов $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$, до травления и после травления.

Установлена корреляция максимального значения коэрцитивной силы $H_c = 4.8$ кЭ со значениями фрактальной энтропии $S_f = 39.86$, фрактальной

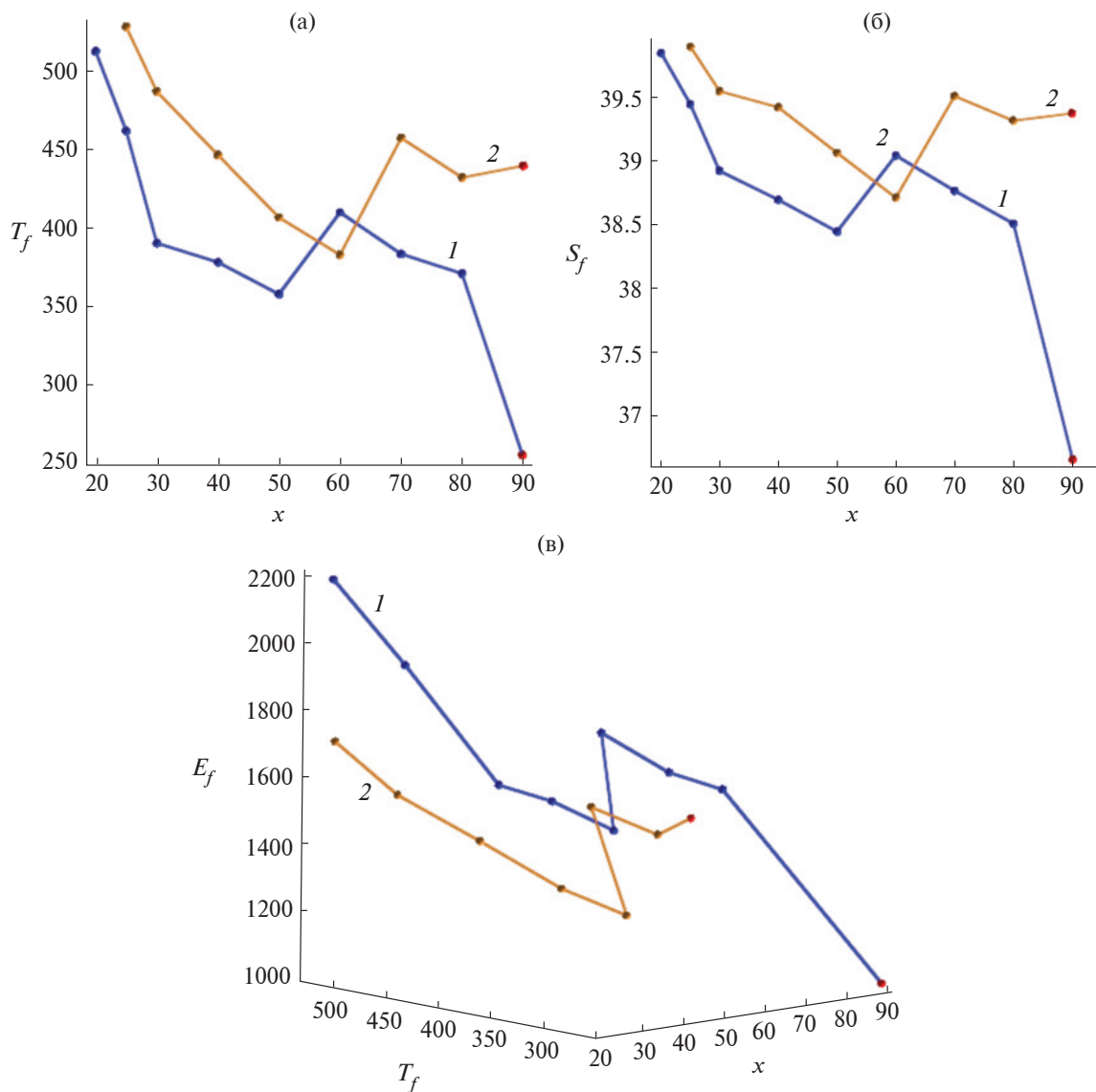


Рис. 8. Диаграммы состояния T_f (а) S_f (б), трехмерная диаграмма состояния E_f , T_f , x (в) образцов до (1) и после (2) травления.

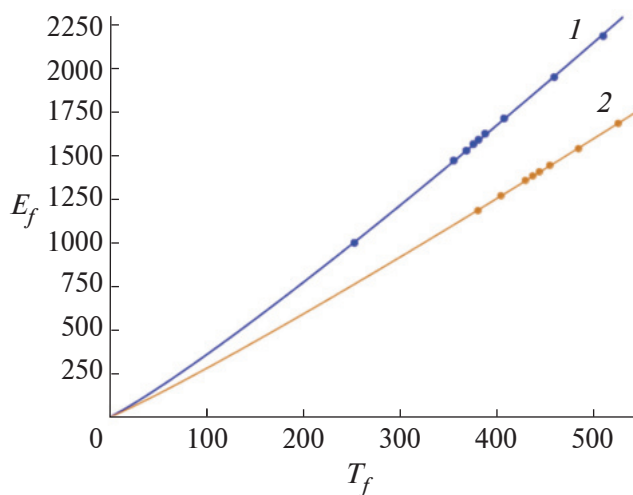


Рис. 9. Диаграммы состояния $E_f(T_f)$ образцов до (1) и после (2) травления.

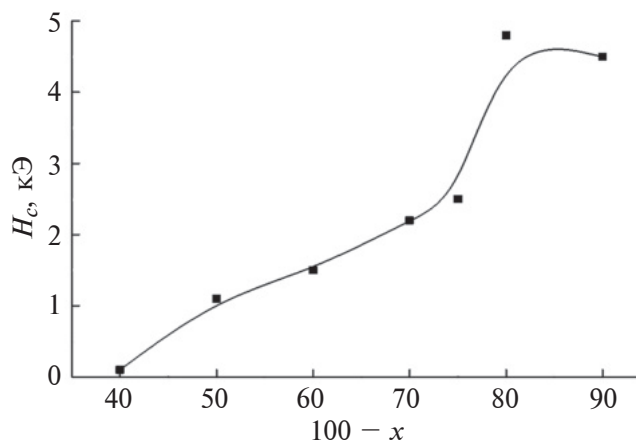


Рис. 10. Концентрационная зависимость коэрцитивной силы быстрозакаленных сплавов $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$, полученных методом разлива расплава на медную плиту

температуры $T_f = 529$ и фрактальной размерности $D = 2.6530$ сплавов $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$ при $x = 20$.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Авторы выражают глубокую благодарность В.П. Маслову за поддержку как разработки теоретических основ модели фрактальная термодинамика, так и ее применения для исследования фрактальных свойств конкретных физических систем. Исследования выполнены при поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 0817-2023-0006) на оборудовании ЦКП ТвГУ.

Конфликт интересов. Авторы данной статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Llamazares S., Calderon F., Bolzoni F., Leccabue F., Hua X.R., Nozieres J.P. // J. Magn. Magn. Mat. 1990. V. 86. P. 307.
2. Karpenkov A.Y., Skokov K.P., Dunaeva G.G., Semenova E.M., Lyakhova M.B., Pastushenkov Yu.G. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2022. V. 55. Iss. 45. P. 455002. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac90d2>
3. Zhdanova O.V., Lyakhova M.B., Pastushenkov Yu.G. // Phys. Metals Metallography. 2011. V. 112. Iss. 3. P. 224. <https://doi.org/10.1134/S0031918X11030306>
4. Van Ende M.A., Jung I.H. // J. Alloys Compd. 2013. V. 548. P. 133. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.08.127>
5. Menushenkov V.P., Andersen S.J., Hoeier R. Electron-microscopy investigations of microstructure in Fe-Nd alloys // Magnetic Anisotropy and Coercivity in Rare-Earth Transition Metal Alloys. Proceedings. P. 97.
6. Landgraf F.J.G., Schneider G.S., Villas-Boas V., Missell F.P. // J. Less Common Metals. 1990. V. 163. Iss. 1. P. 209. [https://doi.org/10.1016/0022-5088\(90\)90101-O](https://doi.org/10.1016/0022-5088(90)90101-O)
7. Kim D.-H., Cho Y.-Ch., Choe S.-B., Shin S.-Ch. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82. P. 3698.
8. Bathany C., Romancer M.L., Armstrong J.N., Chopra H.D. // Phys. Rev. B. 2010. V. 82. P. 184411. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.82.184411>
9. Catalan G., Béa H., Fusil S., Bibes M., Paruch P., Barthélémy A., Scott J.F. // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100. P. 027602. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.027602>
10. Карпузов В.В., Дмитришина Я.Ю. // Электронная обработка материалов. 2015. Т. 51. № 2. С. 31.
11. Bucher J.P. // European J. Phys. 1991. V. 12. № 3.
12. Lisovskii F.V., Lukashenko L.I., Mansvetova E.G. // JETP Lett. 2004. V. 79. P. 352. <https://doi.org/10.1134/1.1765181>
13. Семенова Е.М., Иванов Д.В., Ляхова М.Б. и др. // Известия РАН: Сер. Физ. 2021. Т. 85. № 9. С. 1245.
14. Mikheev S.A., Paramonova E.K., Tsvetkov V.P., Tsvetkov I.V. // Russ. J. Mathematical Phys. 2021. V. 28. P. 251.
15. Tsvetkov V.P., Mikheyev S.A., Tsvetkov I.V. // Chaos, Solitons & Fractals. 2018. V.108. P. 71.
16. Paramonova E., Kudinov A., Mikheev S., Tsvetkov V., Tsvetkov I. Fractal thermodynamics, big data and its 3D visualization // CEUR Workshop Proc. 2021. V. 3041. P. 38.
17. Tsvetkov V.P., Mikheev S.A., Tsvetkov I.V., Derbov V.L., Gusev A.A., Vinitsky S.I. // Chaos, Solitons & Fractals. 2022. V. 161. P. 112301.
18. Мейсуро́ва А.Ф., Цветков В.П., Цветков И.В., Нотов А.А. // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Биология и экология. 2022. № 1. Вып. 65. С. 180.
19. Maslov V.P. // J. Math. Phys. 2016. V. 23. Iss. 2. P. 278.
20. Gwyddion – Free SPM (AFM, SNOM/NSOM, STM, MFM) data analysis software (2021) Department of Nanometrology, Czech Metrology Institute. <http://gwyddion.net>
21. Maple: эффективный инструмент для решения математических задач (2023) Waterloo Maple Inc., Canada. <https://www.maplesoft.com/demo/streaming/Maple15Russian.aspx>

Fractal Properties of the $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$ Alloys Surface in the Fractal Thermodynamics Model

S. A. Mikheev¹, E. M. Semenova¹, Yu. G. Pastushenkov¹, V. P. Tsvetkov¹, I. V. Tsvetkov^{1,*}

¹Tver State University, Tver, 170100 Russia

*e-mail: mancu@mail.ru

The study of the fractal properties of the surface of $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$ alloys in a wide range of concentrations x ($x = 20-90$) was carried out in the framework of the fractal thermodynamics model. To this end, we performed an analysis of images obtained by (scanning electron?) microscopy of the surfaces of a series of $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$ alloys synthesized by induction melting. A high degree of proximity of the surface structure of all the studied samples, both before and after etching, to fractals is shown. The values of the parameter δ characterizing the relative deviation of the studied samples from the fractal are in the range of 0.017–0.029. Three-dimensional diagrams of the fractal parameters S_f , T_f , E_f , x and two-dimensional diagrams of the same parameters: S_f , T_f , E_f , x , reflecting the nature of the state of the surfaces of $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$ alloy samples before and after etching, are constructed. For all investigated samples of alloys, the values of the parameters of the fractal equations of state are calculated. The correlation of the maximum value of the coercive force $H_c = 4.8$ kE with the values of fractal entropy $S_f = 39.86$, fractal temperature $T_f = 529$, and fractal dimension $D = 2.6530$ of the $\text{Nd}_{100-x}\text{Fe}_x$ alloys at $x = 20$ has been established.

Keywords: magnetism, surface structure, fractal structure, fractal equation of state.