

05;12

## **Анизотропия диффузии $^{63}\text{Ni}$ в монокристаллическом кремнистом железе в постоянном магнитном поле**

© А.В. Покоев, Д.И. Степанов

Самарский государственный университет

Поступило в Редакцию 27 сентября 1996 г.

В работе исследовалось влияние постоянного магнитного поля на диффузию изотопа  $^{63}\text{Ni}$  в монокристаллическом кремнистом железе. Установлено, что коэффициент диффузии зависит от температуры отжига, напряженности внешнего магнитного поля, направления градиента концентрации Ni, кристаллографической ориентации образца и не зависит от направления поля.

Изучение примесной диффузии в ферромагнитных металлах в постоянном магнитном поле, на наш взгляд, представляет большой интерес в связи с проблемой диффузионной магнитной аномалии, основные признаки которой сформулированы, например, в обзоре [1], и для выяснения вопроса о степени влияния обменного взаимодействия на диффузионную подвижность атомов в ферромагнетиках. В соответствии с существующими модельными представлениями, развитие которых можно проследить по работам [2–5], природа диффузионной магнитной аномалии связана с магнитным упорядочением ферромагнетика. Внешнее постоянное магнитное поле может изменять степень магнитного порядка в ферромагнетике, и следовательно, должно оказывать влияние на диффузионную подвижность примесей.

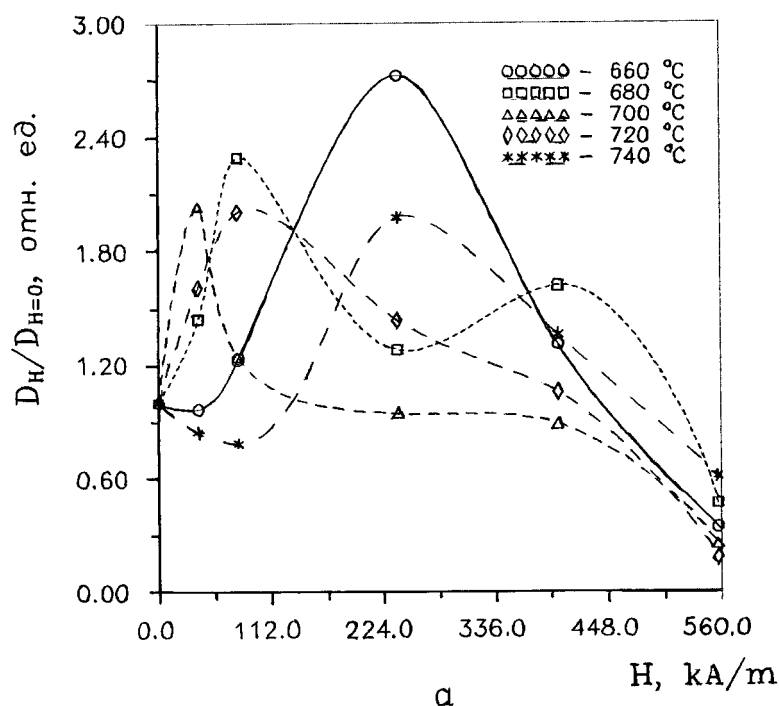
Ранее примесная диффузия в ферромагнитных металлах типа Fe, Co, Ni в постоянном магнитном поле практически не изучалась. В работе [6] обнаружено замедление зернограницной диффузии изотопа  $^{63}\text{Ni}$  в поликристаллическом армкожелезе при температуре 730 °С в магнитном поле с напряженностью 399.4 кА/м, а в [7] впервые выполнены систематические исследования примесной диффузии изотопа  $^{63}\text{Ni}$  по границам и объему зерен поликристаллического армкожелеза в постоянном магнитном поле напряженностью 0–399.4 кА/м при температурах 730 и 860 °С, которые выявили немонотонную зависимость

параметров диффузии от напряженности постоянного магнитного поля. Анализ данных по примесной диффузии Ni в железе и ее диффузионной магнитной аномалии, содержащихся в [1,8,9], а также данных по диффузии этого изотопа в постоянном магнитном поле [6,7] показывает, что измерения коэффициентов диффузии выполнены преимущественно на крупнозернистом поликристаллическом железе. С целью исключения структурного фактора, связанного с наличием границ зерен в образцах, и повышения точности эксперимента в настоящей работе впервые методом радиоактивных изотопов выполнены измерения коэффициента диффузии изотопа  $^{63}\text{Ni}$  в монокристаллическом кремнистом железе (2.4 ат. % Si) с ориентациями [100] и [110] в магнитном поле.

Образцы готовили по методике, изложенной в работе [10]. Измерения коэффициента диффузии выполнены известным методом остаточной активности П.Л. Грузина [11] в интервале температур 660–860 °С, содержащем как ферромагнитную, так и парамагнитную области состояний кремнистого железа (точка Кюри кремнистого железа  $\sim 755$  °С [12]), времен диффузии 0.75–30 ч, напряженностей постоянного магнитного поля 0–557.04 кА/м. Погрешность измерения коэффициента диффузии составляла 6%.

При наложении внешнего постоянного магнитного поля и температурах ниже точки Кюри аррениусовские зависимости коэффициента диффузии в виде  $\ln D = f(1/T)$  становятся существенно нелинейными, и их построение становится нецелесообразным.

На рисунке приведены графики полевых зависимостей относительно коэффициента диффузии  $D_{rel}(H) = D_H/D_{H=0}$ , где  $D_H$  — коэффициент диффузии изотопа  $^{63}\text{Ni}$  в монокристаллическом кремнистом железе при фиксированных значениях температуры и напряженности  $H$  магнитного поля,  $D_{H=0}$  — аналогичное значение коэффициента диффузии без магнитного поля при той же температуре, для двух ориентаций монокристаллов кремнистого железа и различных значений температуры. Для полевых зависимостей коэффициентов диффузии характерно то, что при малых постоянных магнитного поля  $D_{rel}$  возрастает с увеличением напряженности магнитного поля, а в области напряженностей, близких к полям насыщения намагнитченности,  $D_{rel}$  уменьшается, и при  $H = 557.04$  кА/м становится меньше единицы (или  $D_{rel} < 1$ ). Последнее согласуется с данными работы [7]. В промежуточных полях  $D_{rel}$  имеет один основной максимум и в ряде случаев, в отличие от диффузии в поликристаллическом армо железе [7], еще один небольшой

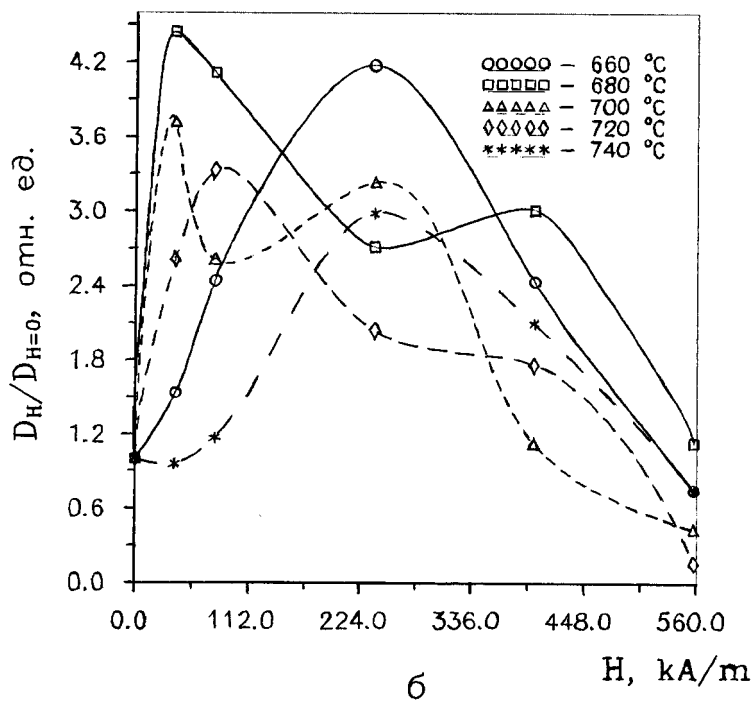


Полевые зависимости относительного коэффициента диффузии изотопа  $^{63}\text{Ni}$  в кремнистом железе:  $a$  — ориентация [100];  $b$  — ориентация [110].

побочный максимум. Отметим, что средний уровень значений  $D_{rel}(H)$  для ориентации [110] в описываемых условиях в 1.5–2 раза выше, чем для ориентации [100], т. е. эффект влияния постоянного магнитного поля на примесную диффузию изотопа  $^{63}\text{Ni}$  для ориентации [110] оказывается более высоким.

При каждой температуре и каждом фиксированном значении магнитного поля измерениям обычно подвергали от 2 до 4 образцов с целью проверки описанного выше поведения. Результаты измерений в пределах ошибки измерений демонстрировали хорошую повторяемость.

Для выяснения вопроса о влиянии направления внешнего постоянного магнитного поля на диффузию изотопа  $^{63}\text{Ni}$  выполнены допол-



(продолжение рисунка).

нительные эксперименты, в которых плоскость диффузионного фронта образцов располагалась перпендикулярно направлению магнитного поля (обычные измерения) и параллельно ему (дополнительные измерения), а также — для прямого и обратного направлений поля. Измерения коэффициентов диффузии, выполненные при фиксированных температуре и напряженности магнитного поля, показали независимость значений коэффициентов диффузии  $^{63}\text{Ni}$  от направления постоянного магнитного поля в пределах погрешности измерений.

При температурах выше точки Кюри, как показали результаты измерений, коэффициент диффузии изотопа  $^{63}\text{Ni}$  в монокристаллическом кремнистом железе для обеих ориентаций не зависит от напряженности магнитного поля и в пределах ошибки измерений совпадает с его

соответствующим значением без поля: относительный коэффициент диффузии изотопа  $^{63}\text{Ni}$  в указанных выше условиях изменялся в пределах  $0.942 \leq D_{rel} \leq 1.059$ .

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы: величина эффекта влияния магнитного поля на примесную диффузию изотопа  $^{63}\text{Ni}$  в монокристаллическом кремнистом железе определяется температурой отжига, напряженностью постоянного магнитного поля, направлением градиента концентрации Ni, кристаллографической ориентацией образца и не зависит от направления внешнего магнитного поля. Эффект в значительной степени определяется изменением диффузионных свойств среды при включении постоянного магнитного поля. Это подтверждает высказанную нами ранее точку зрения в пользу концентрационно-магнитного механизма диффузии магнитно-активной примеси в ферромагнетике в присутствии магнитного поля [13]. Использование монокристаллов в данной работе позволило выявить более тонкие детали поведения полевой зависимости коэффициента диффузии.

Изменение коэффициента диффузии в постоянном магнитном поле может быть также реализовано через изменение магнитного упорядочения среды диффузии, изменение концентрации дефектов и их диффузионных свойств в среде диффузии в магнитном поле, магнитно-стрикционные деформации матрицы и сопутствующие им явления в постоянном магнитном поле. Указанные факторы действуют в разной степени и в направлениях в зависимости от условий протекания, диффузии, что и приводит к появлению немонотонной зависимости коэффициентов диффузии от напряженности постоянного магнитного поля. При температурах выше точки Кюри, когда действие перечисленных выше факторов в ферромагнетиках отсутствует или ослабевает, магнитное поле перестает влиять на измеряемый коэффициент диффузии. Строгое и последовательное рассмотрение наблюдаемого эффекта требует построения и использования такой модели эффективного поля в ферромагнетике, которая достаточно точно и полно учитывала бы его зависимость от температуры, концентрации примеси, особенностей доменной структуры ферромагнетика в постоянном магнитном поле при повышенных температурах. К сожалению, такие модели в настоящее время отсутствуют [14]. Детальный анализ перечисленных проблем и возможных механизмов влияния постоянного магнитного поля на примесную диффузию в кремнистом железе требует отдельного рассмотрения, что, однако, выходит за рамки настоящей работы.

Авторы признательны доктору Я. Кучере и доктору Е. Ииджиме за любезно предоставленные отписки своих статей.

## Список литературы

- [1] *Kučera J., Stransky K.* // *Material Science and Engineering*. 1982. V. 52. P. 1–38.
- [2] *Ruch L., Sain D.R., Yen H.L., Girifalco L.A.* // *J. Phys. Chem. Solids*. 1976. V. 37. P. 649–653.
- [3] *Kučera J.* // *Czech. J. Phys.* 1979. V. 29. P. 797–809.
- [4] *Hirano K., Iijima Y.* // *Defect and Diffusion Forum*. 1989. V. 66–69. P. 1039–1058.
- [5] *Hettich G., Mehrer H., Maier K.* // *Scripta metall.* 1977. V. 11. P. 795–801.
- [6] *Покоев А.В., Степанов Д.И., Трофимов И.С., Миронов В.И.* // *Письма в ЖТФ*. 1991. Т. 17. В. 8. С. 17–20.
- [7] *Pokoev A.V., Stepanov D.I., Trofimov I.S.* et al. // *Phys. Stat. Sol. (a)*. 1993. V. 137. P. K1–K3.
- [8] *Jönsson B.* // *Z. Metallkd.* 1992. V. 83. P. 349–355.
- [9] *Hirano K., Cohen M., Averbach B.L.* // *Acta Met.* 1961. V. 9. P. 440–445.
- [10] *Покоев А.В., Степанов Д.И.* // *Письма в ЖТФ*. 1996. Т. 22. В. 6. С. 28–32.
- [11] *Грузин П.Л.* // *ДАН СССР*. 1952. Т. 86. С. 289–292.
- [12] *Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. акад. И.К. Кикоина.* М.: Атомиздат, 1976. 1006 с.
- [13] *Mironov V.M., Pokoev A.V.* // *Defect and Diffusion Forum*. 1989. V. 66–69. P. 401–407.
- [14] *Вонсовский С.В.* *Магнетизм.* М.: Наука, 1971. 1032 с.