

## ДИФфуЗИОННАЯ МАГНИТНАЯ АНОМАЛИЯ НИКЕЛЯ В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ КРЕМНИСТОМ ЖЕЛЕЗЕ

© А.В.Покоев, Д.И.Степанов

Изучение явления диффузионной магнитной аномалии основные признаки которой сформулированы, например, в [1], представляет большой интерес для выяснения вопроса о степени влияния обменного взаимодействия на диффузионную подвижность атомов в ферромагнетиках. Анализ данных по примесной диффузии  $^{63}\text{Ni}$  в железе и ее магнитной аномалии, содержащихся в [2] и обзорных работах [3-4] показывает, что измерения коэффициентов диффузии (КД) выполнены преимущественно на крупнозернистом поликристаллическом железе и фактор влияния структурного состояния железа на измерения не анализировался. В настоящей работе впервые радиометрическим методом выполнено измерение КД изотопа  $^{63}\text{Ni}$  в монокристаллическом кремнистом железе.

Образцы вырезали из монокристаллов кремнистого железа (2.4 ат. % Si, суммарное содержание остальных примесей — не более 0.04 ат.%) в виде куба с ребром 10 мм и ориентацией рабочих поверхностей в направлениях [100] и [110]. Эти поверхности механически шлифовали, полировали и отжигали в вакууме  $\approx 10^{-2}$  Па при температуре 1000°C в течение часа для снятия напряжений и стабилизации состояния. На подготовленные таким образом рабочие поверхности монокристаллов электролитически наносили тонкие слои никеля, содержащие изотоп  $^{63}\text{Ni}$ , толщиной  $\approx 0.05$  мкм.

Диффузионные отжиги проводили в вакууме  $\approx 10^{-3}$  Па. Продолжительность отжигов при каждой температуре подбирали таким образом, чтобы глубина зоны диффузии составляла 15–20 мкм.

Распределение радиоактивного изотопа  $^{63}\text{Ni}$  в образцах после отжигов определяли методом радиометрического послойного анализа (метод интегрального остатка П.Л. Грузина [5]). Слои толщиной 0.5–2 мкм снимали путем механического шлифования до глубины 20–30 мкм. Толщину удаленных слоев определяли по убыли веса образца. Измерение интенсивности  $\beta$ -излучения изотопа проводили на анализаторе "Бета-1", конструкция счетного устройства кото-

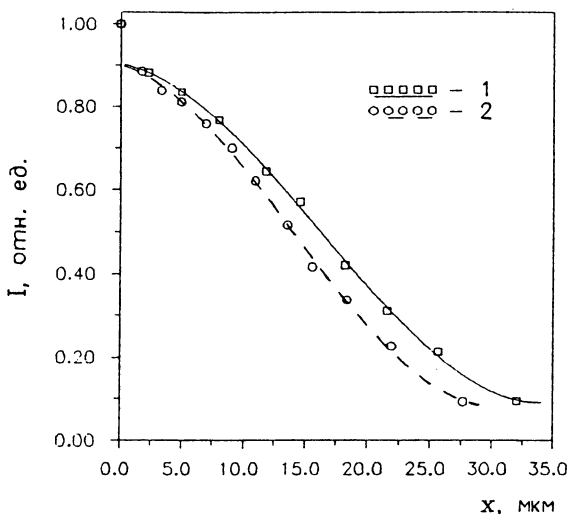


Рис. 1. Распределение относительной активности изотопа  $^{63}\text{Ni}$  по глубине диффузии в монокристаллическом кремнистом железе после отжига при  $740^\circ\text{C}$  в течение 12 ч: 1 — ориентация [100], 2 — ориентация [110].

рого позволяла точно восстанавливать положение образца по отношению к счетчику после снятия очередного слоя.

Измерения выполнены в интервале температур  $660\text{--}860^\circ\text{C}$ , содержащем как ферромагнитную, так и парамагнитную области состояний кремнистого железа (точка Кюри  $\approx 755^\circ\text{C}$ ), и времен диффузии 0.75–30 ч. Погрешность измерения КД составляла  $\approx 6\%$ .

На рис. 1 в качестве примера приведены типичные кривые распределения относительной активности  $I$  изотопа  $^{63}\text{Ni}$ , пропорциональной концентрации никеля, по глубине диффузии  $x$  образцов с двумя различными ориентациями для температуры  $740^\circ\text{C}$  и времени отжига 12 ч. Экспериментальные точки этих распределений хорошо “укладываются” на прямые в координатах  $\ln I - x^2$  (рис. 2), что свидетельствует о выполнении условий протекания диффузии из мгновенного источника диффузии и о механизме диффузии по объему решетки. На рис. 3 приведены аррениусовские температурные зависимости КД  $^{63}\text{Ni}$  в монокристаллическом кремнистом железе вдоль кристаллографических ориентаций [100] и [110], построенные по экспериментальным данным настоящей работы. Как видно из рисунка, в области температур магнитного превращения графики температурных зависимостей КД изотопа испытывают резкий излом (диффузионная магнитная аномалия) и демонстри-

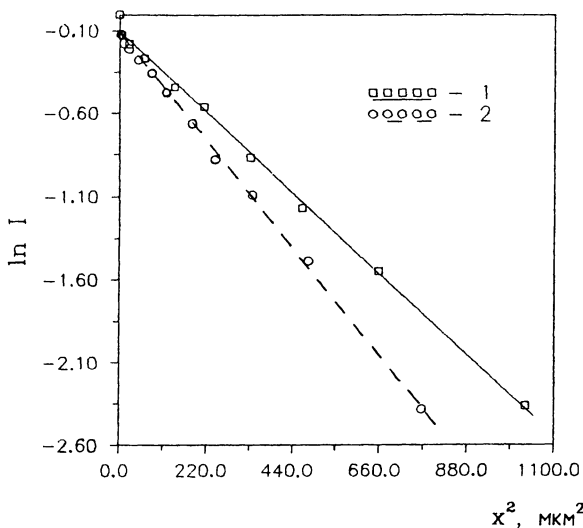


Рис. 2. Зависимость логарифма относительной активности от квадрата глубины проникновения изотопа  $^{63}\text{Ni}$  в монокристаллическом кремнистом железе для отжига при  $740^\circ\text{C}$  в течение 12ч: 1 — ориентация [100], 2 — ориентация [110].

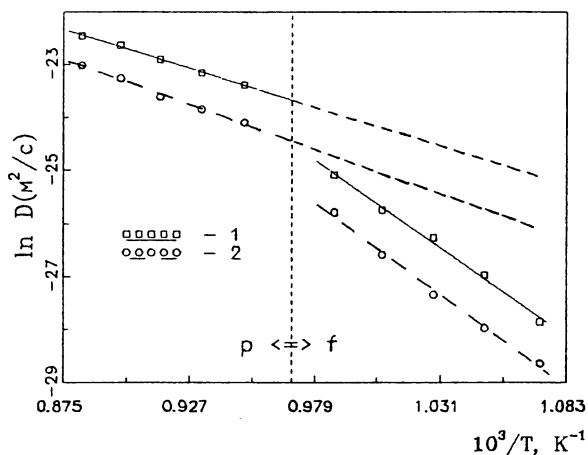


Рис. 3. Температурная зависимость коэффициента диффузии изотопа  $^{63}\text{Ni}$  в монокристаллическом кремнистом железе: 1 — ориентация [100], 2 — ориентация [110].

руют заметную зависимость КД от кристаллографической ориентации (анизотропия диффузии). Рассчитанные методом наименьших квадратов температурные зависимости КД  $^{63}\text{Ni}$  в монокристаллическом кремнистом железе для разных ориентаций имеют вид: для парамагнитной области —

$$D^{[100]} = 0.57_{-0.16}^{+0.23} \cdot 10^{-8} \exp\left(-\frac{(118.98 \pm 3.04) \text{ кДж/моль}}{RT}\right) \text{ м}^2/\text{с};$$

$$D^{[110]} = 0.22_{-0.11}^{+0.23} \cdot 10^{-7} \exp\left(-\frac{(137.11 \pm 6.47) \text{ кДж/моль}}{RT}\right) \text{ м}^2/\text{с};$$

для ферромагнитной области —

$$D^{[100]} = 0.083_{-0.063}^{+0.264} \exp\left(-\frac{(267.35 \pm 11.56) \text{ кДж/моль}}{RT}\right) \text{ м}^2/\text{с},$$

$$D^{[110]} = 0.19_{-0.13}^{+0.40} \exp\left(-\frac{(281.02 \pm 9.12) \text{ кДж/моль}}{RT}\right) \text{ м}^2/\text{с}.$$

Таким образом, результаты настоящей работы показывают, что в случае монокристаллических образцов кремнистого железа диффузионная магнитная аномалия имеет более резкий характер: если в случае поликристаллического железа величина изменения энергии активации при переходе температуры через область точки Кюри составляла  $\Delta Q = 11.25 \text{ кДж/моль}$  [1], то в случае монокристаллов эта величина равна  $\Delta Q^{[100]} = 148.37 \text{ кДж/моль}$  для ориентации [100] и  $\Delta Q^{[110]} = 143.91 \text{ кДж/моль}$  для ориентации [110]. Подобные значения  $\Delta Q$  (по нашим оценкам  $\Delta Q \approx 110-140 \text{ кДж/моль}$ ) наблюдали в [6] при изучении диффузии цинка и олова в бикристаллах железа по границе наклона с осью [100] и углом разориентации  $43^\circ$ , содержащих 5 ат. % кремния. По-видимому, на величину магнитной аномалии  $\Delta Q$  (излома аррениусовской зависимости КД) может оказывать влияние не только магнитный переход, но и структурное состояние среды диффузии, на что ранее не обращали внимания. Возможно, однако, что наблюдаемое изменение энергии активации диффузии связано также и с присутствием кремния. Однозначный ответ на вопрос о влиянии структурного фактора и наличия добавок кремния на величину эффекта диффузионной магнитной аномалии должны дать дополнительные исследования.

## Список литературы

- [1] *Kučera J., Kozak L., Mehrer H.* // Phys. stat. sol. (a). 1984. V. 81. P. 497–505.
- [2] *Hirano K., Cohen M., Averbach B.L.* // Acta Met. 1961. V. 9. P. 440–445.
- [3] *Kučera J., Stransky K.* // Materials Science and Engineering. 1982. V. 52. P. 1–38.
- [4] *Björn Jönsson* // Z. Metallkd. 1992. V. 83. P. 349–355.
- [5] *Грузин П.Л.* // ДАН СССР. 1952. Т. 86. В. 2. С. 289–292.
- [6] *Rabkin E.I., Semenov V.N., Shvindlerman L.S., Straumal B.B.* // Defect and Diffusion Forum. 1989. V. 66–69. P. 819–828.

Самарский  
государственный университет

Поступило в Редакцию  
9 января 1996 г.