

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. С. Рябухин, А. Х. Брегер. «Атомная энергия», 5, 553 (1958).
2. В. А. Эльтекоев, Ю. С. Рябухин. «Атомная энергия», 13, 266 (1962).

3. Д. Ж. Стюарт, П. Цвейфел. Труды Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958 г.). Избр. докл. иностр. ученых. Т. 2. М., Атомиздат, 1959, стр. 600.

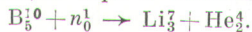
## Трековая автордиография для исследования микрораспределения некоторых элементов в металлах

М. А. КРИШТАЛ, Л. И. ИВАНОВ, Е. М. ГРИНБЕРГ

УДК 539.1.06

В последнее время было признано, что наличие даже незначительного количества примесей в металлах и сплавах (вплоть до  $10^{-6}$ ) может оказывать сильное влияние на их свойства. Поэтому понятна важность разработки довольно простого метода определения малых концентраций примесей в металлах и сплавах.

В работе [1], например, для определения концентрации бора в аустенитных сталях была применена методика травления следов осколков деления в полимерных детекторах, основанная на фиксации треков  $\alpha$ -частиц от реакции бора с тепловыми нейтронами:



В результате этой реакции происходит деление ядер бора на два легких осколка: ядра лития и гелия с энергиями 0,59 и 1,77 Мэв [2]. Изотоп  $\text{B}^{10}$ , содержание которого в естественной смеси изотопов составляет 18,8%, имеет эффективное сечение для тепловых нейтронов 4010 барн [3], что во много раз превышает эффективное сечение элементов, входящих в основу сплава.

Оказалось, что метод позволяет не только определять общее содержание бора вплоть до  $10^{-6}$ , но и изучать его распределение в микроструктуре сплава [1, 4]. Существенными преимуществами этой методики являются стабильность треков, нечувствительность к  $\gamma$ - и  $\beta$ -излучению, простота обработки результатов эксперимента [1, 5—7]. В качестве детекторов в работах [1, 4] использовались пленки нитрата и ацетобутирата целлюлозы, точный состав которых неизвестен.

Аналогичная методика была использована в работе [8] при исследовании диффузии урана в квазибесконечно разбавленных растворах в тантале и железе.

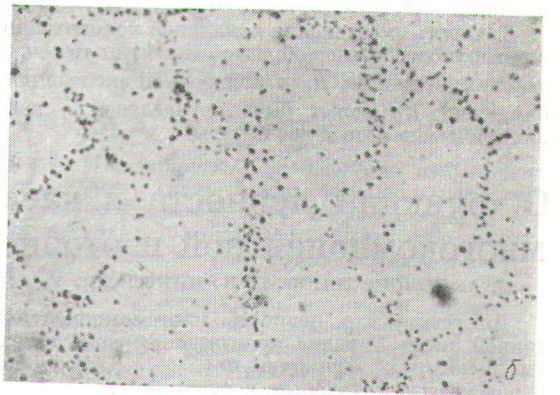
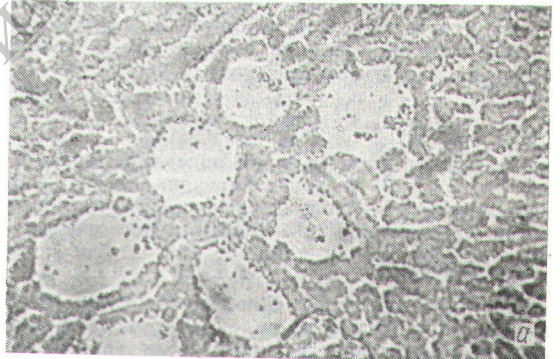
Целью настоящей работы является подбор материала детектора, условий облучения и режима обработки детектора для определения локальной концентрации и распределения бора в металлах и сплавах.

Была использована следующая методика проведения эксперимента. Образцы сплава небольшого размера  $3 \times 3 \times 1$  мм заливались в эпоксидную смолу и полировались. К полированной поверхности с помощью небольшого количества метилизобутилкетона плотно прикладывалась пленка. Благодаря смягчающему действию метилизобутилкетона пленка хорошо прилипала к поверхности образца. Затем образцы вместе с пленкой отжигались на воздухе при  $140\text{--}150^\circ\text{C}$  в течение нескольких часов для удаления лишнего метилизобутилкетона. Увеличение длительности отжига до  $10\text{--}12$  ч способствует уменьшению фона и увеличению четкости протравленного изображения. Дальнейшее увеличение времени отжига приводит к размытию протравленных треков.

Образцы облучались в горизонтальном канале тепловой колонны физического реактора нейтронов. Для защиты от воздействия  $\alpha$ -фона в канале образцы со стороны облучаемой поверхности прикрывались диском

из пленки ацетобутирата целлюлозы толщиной 100 мк. Нейтронный поток был равен  $\sim 7 \cdot 10^7$  нейтр. см $^{-2}$ . сек $^{-1}$ . Время облучения изменялось от 5 мин до 50 ч. После экспозиции пленка механически отделялась от образца и протравливалась в 56%-ном водном растворе КОН при  $50^\circ\text{C}$ . Время травления зависит от длительности отжига и составляет обычно  $10\text{--}30$  мин. Протравленная пленка просматривалась и фотографировалась в оптическом микроскопе при увеличении в  $250\text{--}600$  раз. По характеру расположения и плотности треков делается заключение о распределении и концентрации бора в поверхностном слое образца.

Очевидно, что толщина поверхностного слоя, влияющего на автордиографию, определяется длиной про-



Трековые автордиограммы образцов с различным содержанием бора ( $\times 450$ ):

a — сплав Fe + 2,5% В, отожженный при  $1100^\circ\text{C}$  в течение 10 ч; б — сталь 45X10Г14Ю2, содержащая 0,0005% В, после испытаний на ползучесть.



бега осколков деления в образце (для стали ~1—2 мк). Протравленные треки представляют собой круглые или эллиптические темные пятна, размер которых зависит от длительности отжига и времени травления. Разрешающая способность метода, определяемая размерами травленных треков, составляла ~2 мк. В связи с тем что после травления детекторов, изготовленных из промышленной пленки ацетобутирата целлюлозы, имеет место наличие довольно значительного фона из пятен, похожих на треки, пленки для детекторов были изготовлены в лабораторных условиях. Пленки отливали с помощью щелевой фильеры из 10—15%-ного раствора ацетобутирата целлюлозы различного состава в метиленхлориде с метанолом. Толщина детекторов составляла 30—40 мк. Вид протравленного изображения зависит от величины нейтронной экспозиции и локальной концентрации бора в поверхностном слое образца. При больших нейтронных экспозициях протравленные треки на участках детектора, соответствующих местам повышенной локальной концентрации бора в образце, сливаются в общее пятно. На тех же участках детектора, которые соответствуют местам низкой локальной концентрации бора в образце (например, зерна  $\alpha$ -фазы в сплаве Fe + 2,5% В), заметная плотность треков появляется только при нейтронной экспозиции  $\geq 10^{12}$  нейтр.см<sup>-2</sup> (рисунок а).

На рисунке б показано распределение бора в стали 45X10Г1402 после испытаний на ползучесть. Содержание бора в этой стали по данным химического анализа равно 0,0005 вес.%, трековая автордиограмма получена при нейтронной экспозиции  $\sim 5,5 \cdot 10^{12}$  нейтр.см<sup>-2</sup>.

Концентрация бора в поверхностном слое образца определялась из соотношения

$$\varepsilon = \frac{4\rho_{\alpha}A}{N_0\gamma\sigma IR_0\Phi t} 10^2, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  — концентрация бора в поверхностном слое образца, вес.%;  $\rho_{\alpha}$  — плотность треков, см<sup>-2</sup>;  $A$  — атомный вес бора;  $N_0$  — число Авогадро;  $\gamma$  — массовая плотность образца, г/см<sup>3</sup>;  $\sigma$  — эффективное сечение захвата тепловых нейтронов для В<sup>10</sup>, см<sup>2</sup>;  $I$  — изотопическая доля В<sup>10</sup>;  $R_0$  — средний пробег  $\alpha$ -частиц в образце, см;  $\Phi$  — поток тепловых нейтронов, нейтр.см<sup>-2</sup>.сек<sup>-1</sup>;  $t$  — время экспозиции, сек. В соотношении (1) не учтен фактор эффективности регистрации треков  $\alpha$ -частиц, так как для ряда полимерных детекторов он близок к единице [1, 9—10].

Точность определения локальной концентрации бора в поверхностном слое образца зависит от точности определения величины  $R_0$  и нейтронной экспозиции. Приближенно  $R_0$  может быть определено по известным эмпирическим соотношениям.

## О функции ценности в каскадах для разделения многокомпонентной изотопной смеси

Н. А. КОЛОКОЛЬЦОВ, Б. И. НИКОЛАЕВ, Г. А. СУЛАБЕРИДЗЕ, С. А. ТРЕТЬЯК

УДК 621.039.3

Допустим, что ценность многокомпонентной изотопной смеси  $U$  равна произведению количества смеси на некоторую функцию  $\Phi(N_1, \dots, N_m)$ , которую назовем разделительным потенциалом.

Рассмотрим отдельный элемент противоточного разделительного каскада (см. рисунок). Для такого элемента можно написать уравнение баланса для виде

$$LN_i = L\theta N_i^* + L(1-\theta)N_i^*, \quad (1)$$

С помощью данной методики было исследовано распределение бора в микроструктуре некоторых чистых металлов и сплавов, среднее содержание бора в которых составляло от  $10^{-4}$  до 3—4 вес.% В. Получены данные о характере изменений распределения бора в микроструктуре исследованных металлов после различных видов термообработки.

Таким образом, применение описанной методики позволяет получать достоверные сведения о микро-распределении и локальной концентрации бора в металлах и сплавах и, кроме того, может оказать существенную помощь при исследовании механизма и параметров диффузионных процессов в металлах и сплавах, содержащих примеси бора. Важно отметить, что этот метод незаменим при анализе бора в образцах с использованием нейтронов, получаемых по фотоядерным реакциям на ускорителях вследствие неизбежного большого фона от тормозного  $\gamma$ -излучения.

Методика может быть использована для аналогичных исследований по распределению и измерению локальной концентрации лития, урана и других элементов в металлах и сплавах.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Ю. В. Кириллину и В. К. Горшкову, а также сотрудникам М. В. Прокофьевой и В. А. Петренко за ценную помощь в работе.

Поступило в Редакцию 15/X 1969 г.  
В окончательной редакции 2/IV 1970 г.

## ЛИТЕРАТУРА

1. J. Armijo, H. Rosenbaum. J. Appl. Phys., 38, 2064 (1967).
2. Г. В. Самсонов и др. (Атомная энергия), 24, 191 (1968).
3. Справочник по ядерной физике. Под редакцией Л. А. Арцимовича М., Физматгиз, 1963.
4. J. Hughes, G. Rogers. J. Inst. of Metals, 95, 299 (1967).
5. R. Fleischer et al. Science, 149, 388 (1965).
6. Х. Абдулаев и др. Препринт ОИЯИ, № Р 12-3243. Дубна, 1967.
7. J. Тууп. Материал лаборатории «NORA», Норвегия.
8. F. Keroulas et al. J. Nucl. Materials, 22, 276 (1967).
9. R. Fleischer et al. Phys. Rev., 133, A1443 (1964).
10. W. Stolz, B. Dörschel. Kernenergie, 11, 137 (1968).

причем согласно работе [1]

$$N_i^* - N_i = (1-\theta) N_i \sum_{j=1}^m \varepsilon_{ij} N_j, \quad (2)$$

$$N_i^* - N_i = -\theta N_i \sum_{j=1}^m \varepsilon_{ij} N_j, \quad (3)$$