

ступенях. Сумма потоков на первых n ступенях приближенно можно записать в виде

$$\sum_{i=1}^n L_i = P(c_p - c) \sum_{i=1}^n \frac{1}{\theta_{if}(c, \theta_i)}, \quad (15)$$

где c — средняя концентрация на рассматриваемом участке. Суммарный поток будет минимальным при условии

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{\theta_{if}(c, \theta_i)} = \min. \quad (16)$$

При обогащении вдоль канала [3] функция $F = \frac{1}{\theta f(c, \theta)}$ будет вогнута вверх. Значения θ_i будут колебаться вокруг корня (6), причем при $M < \frac{1}{2}$ амплитуда колебаний θ_i на каждой ступени уменьшится более чем в два раза. Поэтому в зависимости от расположения на кривой F корня уравнения (6) и величины $\partial F / \partial \theta$ суммарный поток будет минимальным в точке $\min_{\theta} F(\theta, c)$ или в точке $\tilde{\theta}$. Численные расчеты показали, что в широком диапазоне α_0 и c_i значение корня $\tilde{\theta}$ находится достаточно близко к $\min_{\theta} F(\theta, c)$, причем разница в величинах суммарных потоков составляет менее 1%. Это позволяет вместо трудоемкого анализа функции F рекомендовать выбор начального значения $\theta_1 = \tilde{\theta}$.

Значение θ можно найти на основании приближенных явных формул, полученных в работе [3] для δ^+ и δ^- , при известной концентрации на первой ступени c_1 . Для этого нужно решить уравнение

$$\delta^+(c_1, \theta) = \delta^- [c_1 + \delta^+(c_1, \theta), \theta]. \quad (17)$$

В настоящей работе рассмотрен случай симметричных каскадов; можно показать, что в несимметричных каскадах точно также счет надо вести от отвала к отбору, а величины θ_i будут быстро сходиться к решению уравнения для $\tilde{\theta}$, аналогичного (6).

Автор выражает искреннюю признательность Н. А. Колокольцову за руководство и ценные советы, способствовавшие улучшению работы, и Г. А. Сулаберидзе за постоянный интерес к работе.

Поступило в Редакцию 19/IV 1973 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колокольцов Н. А., Лагунцов Н. И. «Атомная энергия», 1969, т. 27, с. 560.
2. Колокольцов Н. А., Лагунцов Н. И. «Атомная энергия», 1970, т. 29, с. 300.
3. Колокольцов Н. А., Лагунцов Н. И., Сулаберидзе Г. А. «Атомная энергия», 1973, т. 35, с. 259.
4. Cohen K. The Theory of Isotope Separation. N.Y., 1951.
5. Колокольцов Н. А. «Атомная энергия», 1969, т. 27, с. 9.
6. Демидович Б. П., Марон П. А. Основы вычислительной математики. М., 1970.

Влияние степени графитации углеродного материала на изменение гальваномагнитных эффектов при нейтронном облучении

ПОЛОЖИХИН А. И., ВИРГИЛЬЕВ Ю. С., КОТОСОНОВ А. С., ЕФЕМОВА Г. Ф., КАЛЯГИНА И. П.

УДК 539.1:621.311:661.66

Графиты, применяемые в реакторостроении, обычно являются композиционными материалами и характеризуются структурной неоднородностью, поскольку в объеме материала присутствуют области с различной степенью совершенства структуры. Такая неоднородность существенно влияет на радиационные изменения свойств графита. При облучении пироуглеродов обнаружено уменьшение размерных изменений с ростом степени графитации исходных образцов [1]. Такая же связь между совершенством структуры и количеством дефектов, созданных нейтронным облучением, найдена для образцов сажи, обработанных при различных температурах [2]. Использование гальваномагнитных эффектов при излучении радиационных повреждений в графитах позволяет следить за изменением слоевых дефектов [3], так как последние обуславливают основные изменения в концентрации и подвижности носителей заряда. В настоящей работе исследовано влияние степени графитации на изменение гальваномагнитных эффектов конструкционного материала марки ГМЗ до и после облучения интегральным потоком нейтронов $2,4 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$ ($E \geq 0,18 \text{ Мэв}$) при температуре 150°С .

Степень графитации исследуемого материала изменяли обработкой полуфабриката ГМЗ в диапазоне температур $1500\text{—}3000^\circ \text{С}$ и оценивали по отношению

интенсивности дифракционных максимумов (112) и (110) [4]. На образцах до и после облучения измеряли коэффициент Холла R_H , магнитосопротивление R_M , удельное электросопротивление ρ и параметры кристаллической решетки (межслоевое расстояние d_{002} , диаметр и высоту кристаллитов L_a, L_c).

Рентгеноструктурные характеристики определяли на дифрактометре УРС-50 ИМ на медном излучении. При расчете параметров решетки вносили экспериментальные поправки по эталону — графиту Тайгинского месторождения.

Гальваномагнитные эффекты и электросопротивление измеряли потенциометрическим методом в постоянном электрическом и магнитном полях ($H = 18 \text{ кэ}$) при температурах 300 и 77°К .

В соответствии с увеличением размеров кристаллитов и изменением зонной структуры степень графитации исходных образцов изменялась от 0 до 0,54. Совершенство структуры углеродного материала сопровождается ростом подвижности, уменьшением концентрации носителей заряда и увеличением электронной составляющей в процессе переноса заряда [5]. Характеристики исходных образцов, приведенные в таблице, показывают, что с ростом степени графитации увеличивается магнитосопротивление, знак коэффициента Хол-

Структурные и гальваномагнитные характеристики образцов полуфабриката ГМЗ перед облучением

$t_{обр}, ^\circ\text{C}$	Степень графитации	$L_a, \text{ \AA}$	$L_c, \text{ \AA}$	$\rho \times 10^{-4}, \text{ ом}\cdot\text{см}$	$R_M, \%$	$R_x \times 10^{-2}, \text{ см}^3/\text{кул}$
1500	0	90	75	35,6	0	0
1800	0	130	80	36,0	0	10,4
2000	0,05	280	120	31,4	0	14,7
2300	0,21	660	190	13,8	3,2	-2,6
2600	0,36	1000	245	12,0	4,8	-4,6
2800	0,40	> 1000	245	9,4	6,1	-4,5
3000	0,54	> 1000	240	8,4	10,0	-5,2

ла меняется с положительного на отрицательный, уменьшается электросопротивление.

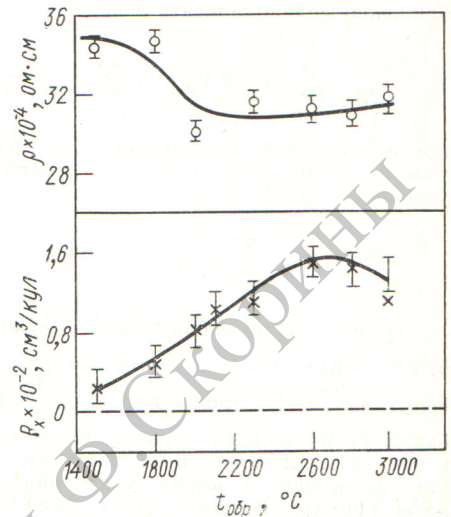
В процессе облучения структура образцов подверглась существенной аморфизации: уменьшились размеры кристаллитов, увеличилось межслоевое расстояние (относительное изменение межслоевого расстояния для всех образцов оказалось примерно одинаковым: 6—7%). Изменились и электрические характеристики, причем для образцов с различной исходной степенью графитации эти изменения оказались различными. Так, если электросопротивление исходных образцов отличалось ~ в 4 раза, после облучения оно стало примерно одинаковым. При этом электросопротивление хорошо графитированных образцов резко возросло, а мало-совершенных несколько уменьшилось по сравнению с исходным значением.

Магнитосопротивление у облученных образцов уменьшилось до нуля, а коэффициент Холла стал положительным. На рисунке представлена зависимость R_x и ρ облученных образцов от температуры предварительной обработки.

Измерения при 300 и 77° К показали, что R_x облученных образцов не зависит от температуры измерения, т. е. свободные носители заряда находятся в вырожденном состоянии. В этом случае можно легко рассчитать концентрацию «дырочных» носителей заряда. Она оказалась ~ в 100 раз больше концентрации собственных носителей заряда в исходных образцах.

Необычное уменьшение электросопротивления после облучения у плохо графитированных образцов связано с этим ростом концентрации носителей заряда, а изменения остальных характеристик, определяющих ρ (плотность материала, подвижность носителей заряда), для плохо графитированных образцов оказались менее значительными.

Подсчеты показали также, что количество избыточных «дырок», созданных облучением, уменьшается при увеличении степени совершенства структуры исходных



Зависимость коэффициента Холла и электросопротивления облученных образцов от температуры предварительной обработки.

образцов. Так, у образца, обработанного при 1500° С, концентрация «дырок» после облучения составляет $12,7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, а при 3000° С — $4,4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. В таком же соотношении находятся и слоевые дефекты, возникшие при облучении (вакансии и их комплексы) [3]. При данных условиях облучения, когда подвижны в основном промежуточные атомы и их простые комплексы [6], отжиг происходит за счет миграции к стокам (границы кристаллитов) и аннигиляции с вакансиями. В этом случае большая подвижность промежуточных атомов в образцах с большей степенью совершенства кристаллической структуры способствует «залечиванию» большего числа вакансий, что соответственно уменьшает концентрацию избыточных «дырок» [2]. Однако вся ситуация и конечный результат могут существенно измениться, если облучать при более высоких температурах, когда вакансии становятся подвижными.

Поступило в Редакцию 11/IX 1972 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kelly B., Brocklehurst J. Tenth Biennial Conf. on Carbon, 1971, RD-123, p. 195.
2. Arnold G., Mrozowski S. Carbon, 1968, v. 6, p. 243.
3. Котосонов А. С. Диссертация. М., 1971.
4. Касаточкин В. И. «Изв. АН СССР. Отд. техн. наук», 1951, т. 9, с. 204.
5. Mrozowski S. Carbon, 1971, v. 9, p. 97.
6. Reynolds W., Throrer P. In: Radiation Damage in Reactor Materials. Vienna, IAEA, 1963, p. 553.