Влияние нейтронного излучения на электропроводность алюминиевого сплава САВ-1

Ш.А. Аликулов*, С.А. Байтелесов, Ф.Р. Кунгуров, Д.П. Таджибаев, Д.Д. Тожибоев

Институт ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан, ул. Хуросон, 1 ,100214, Ташкент, Узбекистан

Получена 22.12.2021

* Corresponding author: e-mail alikulov@inp.uz, Телефоны: (8)-371-289-20-07

Исследована электропроводность конструкционного сплава САВ-1, облученного быстрыми нейтронами флюенсом 10^{17}–10^{19} н/см^2 в диапазоне температур 290–480 К. Установлена нелинейная зависимость удельного сопротивления от дозы и температуры. Показано, что чем больше доза облучения конструкционного материала САВ-1, чем больше флюенс нейтронов, тем больше образуются в кристаллической решетке пары Френкеля, вакансии и междоузельные атомы, и они уменьшают электропроводность материала.

Ключевые слова: электропроводность, сплав САВ-1, быстрые нейтроны, флюенс, удельное сопротивление, доза, кристаллическая решетка, пары Френкеля, точечные дефекты.

The electrical conductivity of the SAV-1 structural alloy, irradiated with fast neutrons with a fluence of 10^{17}–10^{19} n/cm^2, was investigated in the temperature range 290–480 K. A nonlinear dependence of the specific resistivity on dose and temperature was established. It is shown that the higher the irradiation dose of the SAV-1 structural material, the higher the neutron fluence, the more Frenkel pairs, vacancies and interstitial atoms, are formed in the crystal lattice, and they reduce the electrical conductivity of the material.

Keywords: electrical conductivity, SAV-1 alloy, fast neutrons, fluence, resistivity, dose, crystal lattice, Frenkel pairs, point defects.

DOI: https//doi.org/10.52304/.v23i4.291

I. Введение

В последнее время во всем мире вырос интерес исследователей к реакторным материалам. В значительной степени безопасность и экономичность эксплуатируемых ядерных реакторов определяется поведением конструкционных материалов. В качестве конструкционных материалов в активной зоне большинства исследовательских реакторов используется сплав алюминия САВ-1 [1]. В сплавах под действием облучения развиваются различные радиационно-индуцированные структурные превращения, которые определяют изменение свойств материалов в процессе облучения и во многом определяют их радиационную повреждаемость [2, 3]. Эти процессы непосредственно связаны со свободной миграцией точечных дефектов, генерируемых облучением. При нейтронном облучении, наряду со свободно мигрирующими дефектами, возникают также вакансионные кластеры. Диффузионная длина мигрирующих радиационных дефектов зависит от типа и концентрации стоков точечных дефектов, которыми могут служить дислокации, вакансионные кластеры, межфазные границы. Одной из структурно чувствительных характеристик является электропроводность, величина которой может определять степень радиационного воздействия [4, 5].

II. Методика эксперимента

Исследования проводили на образцах алюминиевого сплава САВ-1 промышленной постав-

ки, имеющих цилиндрическую форму диаметром 8 мм и длиной 100 мм. Процентное соотношение элементов, входящих в состав сплава CAB-1, анализировали с помощью рентгеновского микроанализатора «Jeol» JSM 5910 IV (Япония). Плотность образцов CAB-1 определяли с погрешностью 0.1% по измерениям их массы на аналитических весах и линейных размеров с помощью микрометра.

Для облучения быстрыми нейтронами образцы размещали в вертикальном канале исследовательского реактора ВВР-СМ ИЯФ АН РУз [1]. Плотность потока быстрых нейтронов (E>0.1 MeV) в канале составляла 3.3×10^{12} н/см^{2}с. Температуру в канале поддерживали равной 318 K.

Величину электрического сопротивления образцов сплава CAB-1 измеряли четырехзондовым компенсационным методом при токе 1 mA. Удельное электрическое сопротивление ρ определяли из соотношения:

$$\rho = \frac{UR_{эт}S}{U_{эт}L}, \qquad (1)$$

где U и $U_{эт}$ – падение напряжения на измеряемом и эталонном образцах, $R_{эт}$ – сопротивление эталонной катушки, равное 0.01 Ом, S и L – соответственно поперечное сечение и длина образца. Погрешность определения ρ составляла примерно 0.1%.

Зависимость электрического сопротивления образцов CAB-1 от температуры исследовали с помощью печи электросопротивления в диапазоне 290–490 K. Температуру в печи изменяли со скоростью 2–5 K/мин и контролировали хромель-алюмелевой термопарой. Измерения проводили в режиме нагревания и охлаждения через 25 K с выдержкой 30 мин в каждой точке измерения. При этом температуру в измерительной камере поддерживали регулятором температуры в пределах ±0.5 K.

III. Результаты эксперимента и расчета

По результатам измерения массы и объема образцов определена плотность сплава, которая в среднем составила 2.88 г/см^3. Согласно рентгенографическому анализу, массовая доля основных элементов алюминия, кремния и магния в сплаве CAB-1 составила соответственно 97.6, 2.09 и 0.07%,. Массовая доля примеси железа составила 0.05%, никеля 0.04%, меди и цинка по 0.03%. Доля остальных примесей (B, Cd, Na, Ti и др.) составила менее 0.01% (в сумме менее 0.08%). Анализ показал также, что сплав CAB-1, как и чистый алюминий, имеет гранецентрированную кубическую структуру со средним параметром решетки a = 4.066 Å, который на 0.6% больше параметра решетки эталонного образца алюминия (4.0414.Å).

Такое различие легко объясняется, если предположить, что сплав CAB-1 представляет собой твердый раствор внедрения, поскольку кремний и магний не образуют химических соединений с алюминием [6]. Легирующие атомы кремния и магния располагаются в междоузлиях кристаллической решетки, увеличивая размер элементарной ячейки.

Для подтверждения указанного предположения рассчитана концентрация атомов n каждого изотопа (см. таблицу) в чистом алюминии и в исследованном сплаве CAB-1 по формуле:

$$n = \sum_1^m n_i = N_A \sum_1^m \rho_i \frac{A_i}{\mu_i}, \qquad (2)$$

где N_A – число Авогадро, μ_i – молярная масса соответствующего элемента, входящего в состав сплава с массовой долей A_i. В результате получена общая концентрации всех атомов n в сплаве и чистом алюминии, равная соответственно 6.41×10^{22} cm^{-3} и 6.02×10^{22} cm^{-3}.

Таблица. Элементный состава образца CAB- 1

Сплав	Элементный состав (% вес)					
	Al	Si	Mg	Ni	Fe	Cu
CAB-1	97.6	2.09	0.1	0.04	0.14	0.03

Зависимости удельного сопротивления сплава CAB-1 от температуры и дозы облучения приведены на рис. 1, 2 и 3.

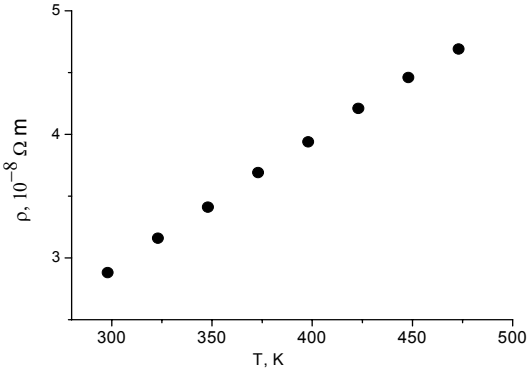


Рисунок 1. Температурная зависимость удельного сопротивления необлученного сплава CAB-1.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.

Видно, что в исследованном диапазоне температур электрическое сопротивление в необлученном образце сплава САВ-1 увеличивается с темпертатурой линейно.

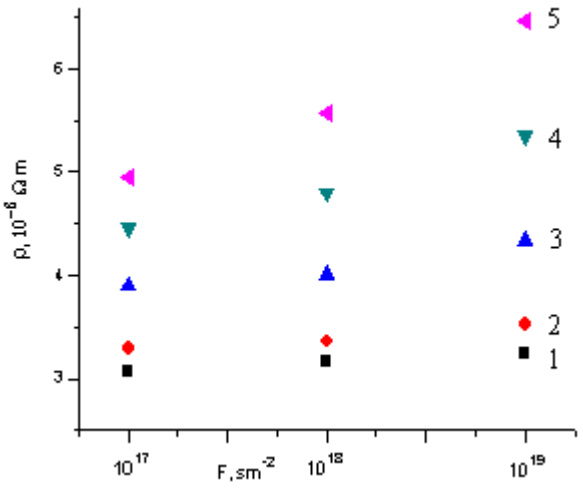


Рисунок 2. Зависимость удельного сопротивления сплава САВ-1 от флюенса нейтронов при температурах 298 K (1), 323 K (2), 373 K (3), 423 K (4) и 473 K (5).

Из рис. 2 видно, что в исследованном диапазоне флюенсов нейтронов удельное сопротивление сплава САВ-1 при всех температурах изменяется относительно слабо. При комнатной температуре оно практически не меняется с флюенсом (зависимость 1), увеличиваясь всего на 4%. Наибольшее изменение удельного сопротивления составляет 30% при температуре 473 K (зависимость 5).

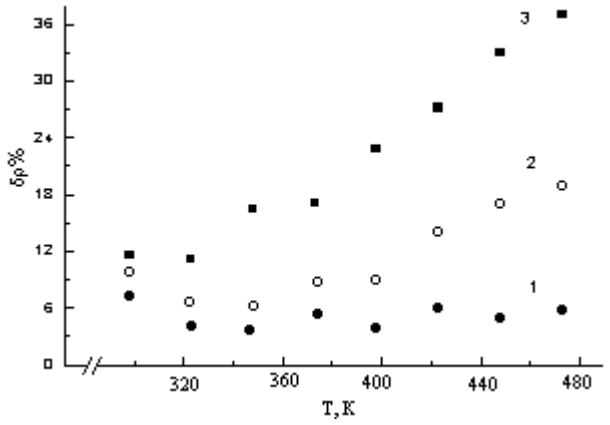


Рисунок 3. Относительное изменение удельного сопротивления сплава САВ-1 от температуры при флюенсах 10^{17} (1), 10^{18} (2) и 10^{19} cm^{-2} (3).

На рис. 3 наблюдаются максимумы, положение которых смещается при изменении дозы облучения.

Исследования показали также, что удельное сопротивление сплава САВ-1, не подвергнутого облучению, возрастает с температурой линейно, и нелинейно в образцах, получивших различные дозы нейтронного облучения.

IV. Анализ экспериментальных данных

В кристаллах твердых растворов внедрения атомы растворенных элементов располагаются в межатомных промежутках кристаллической решетки и приводят к местным искажениям кристаллической структуры сплава. Как следствие, увеличивается средний период решетки, что и наблюдается на опыте в алюминиевых сплавах [5, 7]. Искажения, вносимые в матрицу атомами внедрения, относительно велики из-за малых размеров пор [7], в которых размещаются примесные атомы магния и кремния, поэтому увеличение объема искаженной ячейки значительно [5]. В результате конкретная конфигурация кристаллической решетки сплава характеризуется тем, что одни поры заняты, а другие свободны. Поэтому раствор внедрения можно рассматривать как трехкомпонентную систему из металлических и внедренных атомов и пустых пор [6-9].

Температурная зависимость электропроводности сплавов должна определяться зависимостью подвижности носителей от температуры. В сплавах периодичность потенциала кристаллической решетки, нарушаемая тепловыми колебаниями, дополнительно нарушается беспорядочно распределенными атомами примесей. Это приводит к дополнительному рассеянию носителей заряда и уменьшению их подвижности [10, 11]. В результате величина удельного сопротивления сплава, как правило, выше удельного сопротивления металла, составляющего его основу, поскольку к сопротивлению ρ_T, обусловленному рассеянием на тепловых колебаниях решетки, добавляется остаточное сопротивление $\rho_{ост}$, вызванное структурными дефектами.

Согласно правилу Маттиссена об аддитивности сопротивления [12], общее удельное сопротивление определяется их суммой

$$\rho = \rho_{ост} + \rho_T. \qquad (3)$$

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.

При этом температурный коэффициент сопротивления сплава $\alpha_{спл}$ можно представить в виде [13]:

$$\alpha_{спл} = \frac{1}{\rho_{ост} + \rho_T} \frac{d\rho_T}{dT}. \quad (4)$$

Выражение (4) получено в предположении о независимости $\rho_{ост}$ от температуры. Видно, что температурный коэффициент сопротивления сплава должен быть меньше α для чистого металла, причем тем меньше, чем больше $\rho_{ост}$ отличается от ρ_T. После простых преобразований из выражения (4) получается соотношение, позволяющее определить $\rho_{ост}$ для сплава:

$$\rho_{спл} = \rho_T \frac{\alpha - \alpha_{спл}}{\alpha_{спл}}. \quad (5)$$

Расчет по формуле (5) с использованием литературных данных по $\alpha = 0.0038$ K^{-1} и $\rho_T = 2.7\times10^{-8}$ Ω·m для чистого алюминия [12] и значения $\alpha_{спл} = 0.00354$ K^{-1} для необлученного сплава САВ-1, определенного экспериментально (рис. 1), дал значение $\rho_{спл} = 2.9\times10^{-8}$ Ω·m, которое хорошо совпадает с экспериментальным значением $\rho_{спл} = 2.88\times10^{-8}$ Ω·m для необлученного сплава САВ-1 в исследованном диапазоне температур.

V. Заключение

Таким образом, анализ полученных экспериментальных результатов позволил установить, что сплав САВ-1 по своей структуре является твердым раствором внедрения и что удельное сопротивление сплава изменяется нелинейно как от температуры, так и от дозы облучения. При этом с ростом флюенса нейтронов отклонение от линейной зависимости и соответственно скорость роста сопротивления сплава с температурой увеличиваются. Чем больше флюенс нейтронов при облучении конструкционного материала САВ-1, тем больше образуются в кристаллической решетке пары Френкеля, вакансии и междоузельные атомы, и соответственно уменьшается электропроводность материала.

Метаданные

Influence of neutron radiation on the electrical conductivity of the SAV-1 aluminum alloy

Sh.A. Alikulov, S.A. Baytelesov, F.R. Kungurov, D.P. Tadjibaev, D.D. Tojibaev

Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Mirzo Ulugbek district, Ulugbek township, Khuroson str., 1, 100214, Tashkent, Uzbekistan.

The electrical conductivity of the SAV-1 structural alloy, irradiated with fast neutrons with a fluence of 10^{17}–10^{19} n/cm^2, was investigated in the temperature range 290–480 K. A nonlinear dependence of the specific resistivity on dose and temperature was established. It is shown that the higher the irradiation dose of the SAV-1 structural material, the higher the neutron fluence, the more Frenkel pairs, vacancies and interstitial atoms, are formed in the crystal lattice, and they reduce the electrical conductivity of the material.

Keywords: electrical conductivity, SAV-1 alloy, fast neutrons, fluence, resistivity, dose, crystal lattice, Frenkel pairs, vacancies and interstitial atoms, point defects.

Литература (References)

[1] S.A. Baytelesov, F.R. Kungurov, B.S. Yuldashev. Analysis of different configurations of active zones reactor VVR-SM. Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, **2**, 31-37 (2019).

[2] O.P. Maksimkin, A.V. Yarovchuk, D.S. Aulova, et al., Corrosion resistance of the aluminum alloy SAV-1 after operation the core of a VVR-K reactor and storage in a water pool. Voprosy Atomnoy nauki i Tekhniki **5**(96), 78-83 (2010).

[3] V.M. Lebedev, V.T. Lebedev, I.N. Ivanova, et al. Structure of aluminum alloys irradiated by neutrons in a reactor. Fizika Tverdogo Tela **52**, No.5, 934-936 (2010).

[4] S.A. Baytelesov, U.S. Salikhbaev, V.N. Sandalov, F.R. Kungurov, U.A. Khalikov. Electrical conductivity of aluminum alloys irradiated with neutrons. Atomnaya Energiya **109**, No.3, 148-152 (2010).

[5] Sh.A. Alikulov, F.R. Akhmedzhanov, S.A. Baytelesov, A.F.. Boltabaev, E.T. Rakhimov, U.S. Salikhbaev. Effect of neutron radiation on structure and electrical conductivity of aluminum alloys SAV-1. Uzbek Journal of Physics **17**, №4, 248-253 (2015).

[6] Aluminum alloys (properties, treatment, application). Spravochnik. Ed. Kh. Nil'sen. (Moscow, Metallurgiya, 1979)

[7] T.V. Yur'evich, K.T. Ivanova et al. Fizika metallov, teoreticheskaya podgotovka po distsipline, 2008, 292 c.

[8] Ya.S. Umanskiy, Yu.A. Skakov. Fizika metallov. Atomnoe stroenie metallov i splavov: uchebnik lkya vyzov. (Moscow, Atomizdat, 1978).

[9] S.E. Danilov, V.L. Arbuzov, B.N. Goshitsliy, A.E. Kar'kin, V.A. Pavlov, V.D. Parkhomenko. Voprosy Atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: fizika radiatsionnykh povrejdeniy i radiatsionnoe materialovedenie **90**, No.2, 43-47 (2007).

[10] V.M. Lebedev, V.T. Lebedev, S.P. Orlov et al. Investigation of nanosize structure of alloy SAV-1, irradiated with quick neutrons upto high fluencies by the method of low corner dispersion of neutrons. FTT **56**, No.1, 160-164 (2014).

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.

[11] Kh.I. Kuntse. Metody fizicheskikh izmereniy (Moskow, Mir, 1989).
[12] A.P. Korolev, S.N. Barshetin. Materialy elektroniri i elektrotekhniki. Uchebnoe posobie. (Tambov, TGTU, 2010).
[13] Sh.A. Alikulov, F.R. Akhmedzhanov, S.A. Baytelesov, A.F. Boltabaev, F.R. Kungurov, E.T. Rakhimov, U.S. Salikhbaev. Electrical conductivity and thermal conductivity of aluminum alloys SAV-1 and AMG-2 at high temperatures. Atomnaya Energiya **117**, No.5, 270-273 (2015).

Алюмин қотишмаси САВ-1 нинг электр ўтказувчанлигига нейтрон нурланишининг таъсири

Ш.А. Аликулов, С.А. Байтелесов, Ф.Р. Кунгуров, Д.П. Таджибаев, Д.Д. Тожибоев

Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академияси ядро физикаси институти, Хуросон кўчаси, 1-уй., 100214, Тошкент, Ўзбекистон

10^{17}–10^{19} н/см^2 флюенсларда нурлантирилган САВ-1 қотишмасини 290-480 К ҳароратлар оралиғида электр ўтказувчанлиги тадқиқ қилинди. Солиштирма қаршиликнинг ҳароратга ва дозаларга чизиқли бўлмаган боғлиқлиги ўрганилди. САВ-1 қобиқ материалининг нурланиш дозаси қанчалик катта бўлса, нурланиш оқими қанчалик кўп бўлса, шунча кўп кристалл панжарада Франкел жуфтлари – вакансиялар ва тугунлараро атомлар хосил бўлади ва улар материалнинг электр ўтказувчанлигини камайтириши кўрсатилди.

Калит сўзлар. электр ўтказувчанлик, САВ-1 қотишмаси, тез нейтронлар, флюенслар, қаршилик, доза, кристалл панжара, Френкел жуфт, вакансиялар ва тугунлараро атомлар, нуқтавий нуқсонлар.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.