

УДК 537.8:621.715:539.376

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫМИ РЕЛЯТИВИСТСКИМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ СПЛАВА Д16

С. Е. Донец

Младший научный сотрудник*

В. В. Литвиненко

Доктор технических наук, старший научный сотрудник, ученый секретарь*

Ю. Б. Полторацкий

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник*

А. Г. Пономарев

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ННЦ**

В. Т. Уваров

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ННЦ**

*Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины
ул. Гуданова, 13, г. Харьков, 61002
Контактный тел.: (057) 700-41-11**Харьковский физико-технический институт НАН Украины
ул. Академическая, 1, г. Харьков, 61108
Контактный тел.: (057) 335-66-49

У статті розглянуто розрахунок та конструкцію накладного вихорострумового датчика для вимірювання електропровідності металевих зразків. Виявлено зміну електропровідності сплаву Д16 після опромінення сильнострумовим релятивістським електронним пучком. Досліджено зміни в розподілі валентних електронів сплаву Д16.

Ключові слова: вихорострумовий датчик, валентні електрони, електропровідність.

В статье рассмотрен расчет и конструкция накладного вихретокового датчика для измерения электропроводности металлических образцов. Определено изменение электропроводности сплава Д16 после облучения сильноточным релятивистским электронным пучком. Исследовано изменение в распределении валентных электронов сплава Д16.

Ключевые слова: вихретоковый датчик, валентные электроны, электропроводность.

Calculation and a design of attachable eddy current detector for electroconductivity measurement of metal samples is considered in article. Change of electroconductivity of alloy D16 after an irradiation by highcurrent relativistic electron beam is defined. Change in valency electrons distribution in alloy D16 is investigated.

Keywords: eddy current detector, valency electrons, electroconductivity.

1. Введение

Взаимодействие сильноточных релятивистских электронных пучков (СРЭП) с металлическими мишенями представляет достаточно сложную последовательность процессов на уровне электронной и ионной подсистем, иницируемых радиационными и ионизационными потерями энергии частиц. Результатом такого взаимодействия является изменение эксплуатационных свойств облучаемых объектов — пластичности, коррозионной и эрозионной стойкости, микротвердости и др. На микроуровне одним из проявлений последствий воздействия СРЭП является измельчение зеренной структуры вплоть до наномасштабных размеров [1], перераспределение элементов на границах зерен [2] и др. В этой связи сильноточные электронные пучки рассматриваются как перспективный инструмент модификации свойств твердых тел и создания новых радиационных нанотехнологий.

Использование СРЭП для получения компонентов новых электротехнических материалов, например, нано-

порошков, пористых металлов и др. предполагает необходимость контроля электрической проводимости, поскольку известно [3], что стимулируемая излучением эволюция дислокационной структуры приводит к изменению проводимости сплавов. В случае же воздействия на сплавы СРЭП мы можем ожидать проявления более сложных механизмов, приводящих к изменению свойств облучаемого объекта ввиду комплексности воздействия (радиационное, температурное, ударно-волновое, электромагнитное).

2. Постановка задачи и методы исследования

Ввиду комплексности требований к материалам с модифицированными свойствами при их последующей эксплуатации, достаточно высокой стоимости энергии СРЭП, что важно для прогнозирования рентабельности будущего технологического процесса, уже на стадии разработки научных основ новых технологий представляет-

ся важной задачей разработки неразрушающих методов оценки свойств сплавов после облучения в том числе определения их электрофизических свойств. Превращение в сплав Д16 под действием СРЭП (энергия электронов ~350 кэВ, ток пучка ~2 кА, длительность импульса ~5 мкс) изучались авторами в работах [1, 2], поэтому представляется уместным дополнить эти исследования изучением модифицирующего воздействия на электрофизические характеристики — электрическую проводимость и распределение спектра валентных электронов. Для измерения электрической проводимости целесообразно применить вихретоковый метод. Для чего необходимо рассчитать и изготовить накладной вихретоковый датчик. Наличие такого датчика позволит сопоставить результаты измерения проводимости с ранее известными фактами измельчения зёрновой структуры сплава и перераспределением легирующих примесей, а также с измеренными спектрами распределения валентных электронов. В основу расчета измерительной схемы для оценки электрической проводимости положены известные значения глубины модифицирующего воздействия, составляющие порядка 400 мкм.

3. Расчет и конструкция накладного вихретокового датчика

В качестве вихретокового датчика был выбран накладной абсолютный трансформаторный преобразователь, для которого, в отличие от параметрического, выходной сигнал значительно меньше зависит от температуры преобразователя. Схематически такой преобразователь с исследуемым объектом представлен на рис. 1.

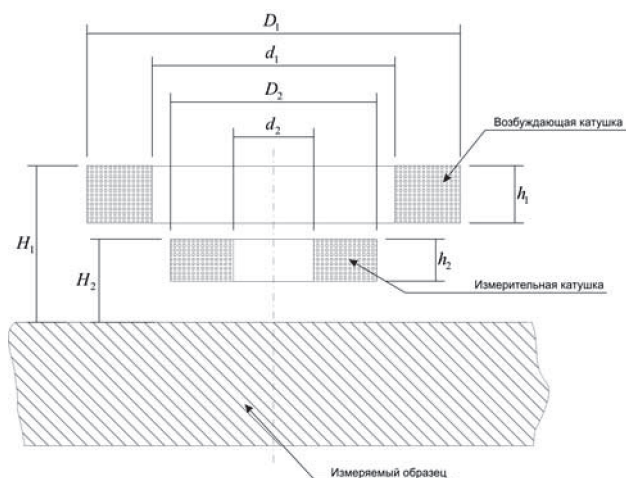


Рис. 1. Расчетная модель вихретокового преобразователя

В проводящей среде токи смещения малы по сравнению с другими составляющими полного тока. В неподвижной, относительно электромагнитного тока среде токи переноса отсутствуют. Тогда плотность полного тока определяется:

$$\vec{J}_{\text{полн}} = \sigma \cdot \vec{E} + \vec{J}_{\text{стор}},$$

где $\vec{J}_{\text{стор}}$ — плотность сторонних токов; \vec{E} — вектор напряженности электрического поля; σ — проводимость среды.

Поскольку сторонний ток изменяется по закону синуса (такой ток создает монохроматическое электромагнитное поле), то выражение для векторного потенциала \vec{A} определяется [4]:

$$(\mathbf{j}\omega\sigma - \omega^2\epsilon_0\epsilon_{\text{отн}}) \cdot \vec{A} + \nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0\mu_{\text{отн}}} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}_{\text{стор}},$$

где \mathbf{j} — мнимая единица; ω — круговая частота; $\epsilon_0\epsilon_{\text{отн}}$ — диэлектрическая проницаемость среды; $\mu_0\mu_{\text{отн}}$ — магнитная проницаемость среды.

Т. к. задача обладает осевой симметрией, существуют только Ψ -составляющие векторов плотности тока и векторного потенциала.

На рис. 2 представлена схема, примененная для объединения конечноэлементной модели и внешней цепи (диод и вольтметр приняты идеальными).

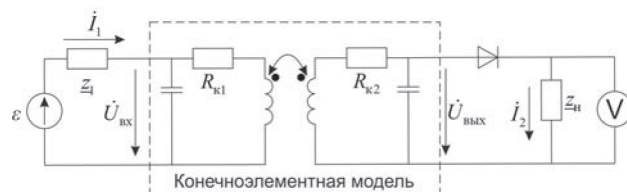


Рис. 2. Расчетная схема преобразователя

Для изображенной схемы справедливы следующие уравнения:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 \cdot Z_1 + \dot{U}_{\text{вх}} = \dot{\epsilon}; \\ -\dot{U}_{\text{вых}} + \dot{I}_2 \cdot Z_2 = 0. \end{cases}$$

Поскольку катушка намотана тонким проводом, то распределением плотности тока по сечению витка пренебрегаем, и принимаем однородным. Ток витка определяется следующим образом (S_B — площадь поперечного сечения витка, \mathbf{j} — плотность тока в катушке, \dot{E} — комплексная амплитуда напряженности электрического поля):

$$\dot{I}_B = \int_{S_B} \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} = \int_{S_B} \sigma \cdot \dot{E} \cdot d\mathbf{S}.$$

Считая, что длина витка l_B , получим:

$$\dot{E} = -\mathbf{j} \cdot \omega \cdot \vec{A} + \frac{\dot{U}_B}{l_B},$$

тогда

$$\dot{I}_B = -\mathbf{j} \cdot \omega \cdot \int_{S_B} \vec{A} \cdot d\mathbf{S} + \sigma \cdot S_B \cdot \frac{\dot{U}_B}{l_B},$$

откуда

$$\dot{U}_B = \frac{l_B}{\sigma \cdot S_B} \left[\dot{I}_B + \mathbf{j} \cdot \omega \cdot \int_{S_B} \vec{A} \cdot d\mathbf{S} \right].$$

Для катушки, имеющей N витков:

$$\dot{U}_K = R_K \cdot \dot{I}_K + \mathbf{j} \cdot \omega \cdot \sum_{i=1}^N \int_{S_{Bi}} \vec{A} \cdot d\mathbf{S},$$

где R_K — сопротивление катушки постоянному току.

С учетом последнего выражения

$$\begin{cases} \dot{I}_1 \cdot z_1 + R_{k1} \cdot \dot{I}_1 + j \cdot \omega \cdot \sum_{i=1}^{N_1} \int_{S_{Bi}} \dot{A} \cdot dS = \dot{\varepsilon}; \\ -R_{k2} \cdot \dot{I}_2 - j \cdot \omega \cdot \sum_{i=1}^{N_2} \int_{S_{Bi}} \dot{A} \cdot dS + \dot{I}_2 \cdot z_2 = 0. \end{cases}$$

Таким образом, окончательная система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} (j\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon_{отн}) \cdot \dot{A} + \nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_{отн}} \nabla \times \dot{A} \right) = \dot{J}_{стоп}; \\ \dot{I}_1 = \frac{\dot{\varepsilon} - j \cdot \omega \cdot \sum_{i=1}^{N_1} \int_{S_{Bi}} \dot{A} \cdot dS}{z_1 + R_{k1}}; \\ \dot{I}_2 = \frac{j \cdot \omega \cdot \sum_{i=1}^{N_2} \int_{S_{Bi}} \dot{A} \cdot dS}{z_2 - R_{k2}}, \end{cases}$$

где $\dot{J}_{стоп} = \begin{cases} \frac{\dot{I}_1}{S_{B1}} \cdot \vec{I}_\psi, & \text{в первичной катушке;} \\ \frac{\dot{I}_2}{S_{B2}} \cdot \vec{I}_\psi, & \text{во вторичной катушке;} \\ 0, & \text{во всех других проводниках.} \end{cases}$

Поскольку датчик должен работать на высоких частотах, то важным является уменьшение его паразитной емкости. Этого можно добиться выбором наиболее оптимального расположения катушек и применением материалов с наименьшей диэлектрической проницаемостью. Для каркаса катушки была выбрана пропарафиненная бумага, катушка после намотки заливалась парафином.

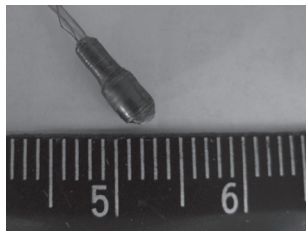


Рис. 3. Внешний вид сборки измерительной и возбуждающей катушек



Рис. 4. Внешний вид вихретокового датчика

Внешний вид катушки изображен на рис. 3. Для локализации магнитного поля и уменьшения диаметра зоны контроля катушки помещены в экран из меди. К выводам катушек припаяны кабели. Вся конструкция в сборе представлена на рис. 4.

Структурная схема измерительного стенда представлена на рис. 5. Генератор тока на основе высокочастотного генератора Г4-153 позволяет в плавных пределах изменять частоту вынуждающего тока от 40 кГц до 10 МГц.

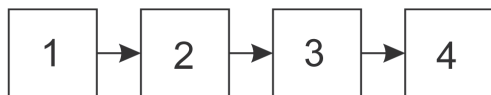


Рис. 5. Структурная схема измерительного стенда: 1 — генератор синусоидального тока; 2 — вихретоковый датчик; 3 — выпрямитель; 4 — регистрирующий прибор

Частота вынуждающего тока выбирается такой, чтобы глубина проникновения электромагнитного поля в образец была меньше толщины переплавленного слоя.

Измерение проводимости образцов осуществляется по ГОСТ 27333-87.

4. Результаты измерения проводимости сплава Д16

В исходном состоянии для трех образцов сплава Д16 проводимость находилась в диапазоне (18,2...18,8) МСм/м.

Известно, что после облучения концентрация легирующих примесей в приповерхностном слое сплава увеличивается, по сравнению с исходными образцами [2]. Кроме этого в зоне воздействия СРЭП возникают эффекты, связанные с термическим воздействием и др. Измерение проводимости облученных образцов дало значения (15,9...16,6) МСм/м.

5. Измерение спектра валентных электронов сплава Д16

При облучении металлов основным является эффект уменьшения подвижности за счет введения новых центров рассеяния — радиационных дефектов и самих внедрившихся частиц. Так как с изменением температуры распределение электронов по энергиям в металле практически не изменяется, то сечение рассеяния электронов на этих дефектах от температуры не зависит и их вклад в увеличение сопротивления можно считать постоянным.

Исследования спектра валентных электронов поверхности образцов сплава Д16 проводились методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии на спектрометре XPS-800 Kratos. Давление в камере прибора составляло $5 \cdot 10^{-8}$ Торр. Фотоэлектроны возбуждались MgK_{α} -излучением с энергией фотонов $h\nu = 1253,6$ эВ. Параметры активирующего рентгеновского излучения: $U = 15$ кВ, $J = 20$ мА. Кинетическая энергия электронов анализировалась полусферическим электростатическим анализатором. Разрешение спектрометра ~ 1 эВ, точность определения энергии связи — 0,3 эВ. Спектры обрабатывались на компьютере: проводилось сглаживание, вычитание постоянного фона и фона неупругих потерь по методу (Shirley), удаление уширяющего действия рентгеновской линии (итерационная развертка) и разложение сложной линии на составляющие ее компоненты.

Толщина анализируемого слоя ~ 5 нм. Перед установкой в вакуум поверхность образца протиралась изопропиловым спиртом. Для уменьшения слоя углеродородных загрязнений образцы подвергались ионной бомбардировке в вакууме (Ar^+ , $E = 2,5$ кэВ, скорость распыления $100 \text{ \AA}/\text{мин}$).

Как видно из рис. 6, вследствие облучения поверхности, существенно изменяется спектр валентных электронов. Измерение электропроводимости вихретоковым методом показало ее уменьшение на $\sim 10\%$. Это можно объяснить как уменьшением зеренной структуры так и уменьшением энергии связи валентных электронов.

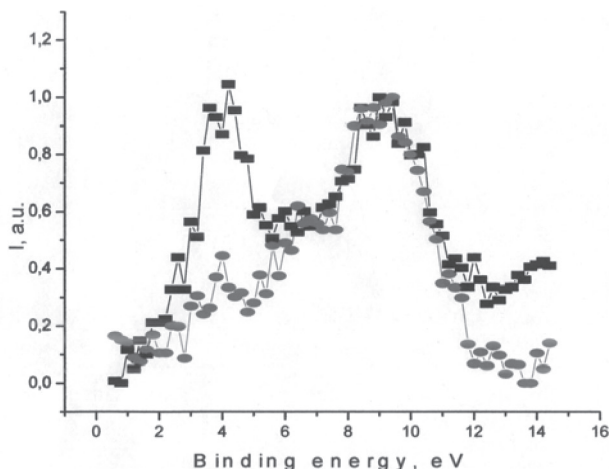


Рис. 6. Спектры валентных электронов сплава Д16: овалы — до облучения, прямоугольники — после облучения

6. Выводы

Облучение сплава Д16 сильноточным релятивистским пучком электронов с энергией частиц $E \sim 350$ кэВ, током пучка $I \sim 2$ кА, длительностью импульса $\tau \sim 5$ мкс приводит к уменьшению его электропроводности на $\sim 10\%$, что сопровождается смещением спектра энергии связи валентных электронов в сторону меньших энергий,

измельчением зеренной структуры, сегрегацией легирующих примесей на границах зерен.

Литература

1. Брюховецкий В. В. Влияние импульсного электронного облучения на параметры сверхпластичности дюралюмина [Текст] / В. В. Брюховецкий, В. В. Литвиненко, В. Ф. Клепиков и др. // Физика и химия обработки материалов. — 2002. — № 4. — С. 33–38.
2. Арсенюк В. В. Стимулирование неоднородностей в сильноточных пучках электронов и их влияние на процессы массопереноса в облучаемых мишенях [Текст] / В. В. Арсенюк, Н. И. Базалеев, С. Е. Донец и др. // Вопросы атомной науки и техники, сер. ФРПРМ. — 2007. — № 6(91). — С. 116–119.
3. Данилов С. Е. Влияние стоков разного типа на радиационную повреждаемость аустенитных FeNi сплавов при электронном и нейтронном облучении [Текст] / С. Е. Данилов, В. Л. Арбузов, Б. Н. Гощицкий и др. // Вопросы атомной науки и техники, сер. ФРПРМ. — 2007. — № 2(90). — С. 43–47.
4. Сильвестер П. Метод конечных элементов для радионинженеров и инженеров-электриков [Текст]: пер. с англ. / П. Сильвестер, Р. Феррари. — М.: Мир, 1986. — 229 с.

УДК 539.2; 669.24

ІНТЕРКАЛАТНІ НАНОСТРУКТУРИ КОНФІГУРАЦІЇ НЕОРГАНІЧНИЙ НАПІВПРОВІДНИК/РОДАМІН Ж

І. І. Григорчак

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедрою
Кафедра інженерного матеріалознавства та прикладної фізики
завідувач лабораторії
Лабораторія молекулярної фізики та нано-енергетики*
Контактний тел.: (032) 258-22-67
Email: lvangr@rambler.ru

Ф. О. Іващин

Молодший науковий співробітник*
Кафедра інженерного матеріалознавства та прикладної фізики
Email: Fivash@i.ua

Т. М. Біщанюк

Студентка*
Email: mouse.tania@gmail.com

*Національний університет «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна 79013

Накладання освітлення і постійного електричного поля при формуванні інтеркалатних наноструктур неорганічний напівпровідник/родамін Ж приводить до: колосального росту діелектричної проникності; появи ефекту «від'ємної ємності»; акумулювання світлової енергії.

Ключові слова: інтеркаляція, імпедансна спектроскопія, родамін Ж.

Наложение освещения и постоянного электрического поля при формировании интеркалатных наноструктур неорганический полупроводник/родамин Ж приводит к: колоссальному росту диелектрической проникності; появления эффекта «отрицательной емкости»; аккумуляции световой энергии.

Ключевые слова: интеркаляция, импедансная спектроскопия, родамин Ж.

Applied illumination and constant electric field at the formation of intercalative nanostructures «inorganic semiconductor/rhodamine G» leads to enormous growth of permittivity, onset of effect «negative capacity» and accumulation of light.

Keywords: Intercalation, impedance spectroscopy, Rhodamine G.