

С. Л. Тимченко

**ОСОБЕННОСТИ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУРНО-
НЕОДНОРОДНЫХ ПРОВОДЯЩИХ СРЕД**

Исследована электропроводимость структурно-неоднородных проводников при высокой плотности тока ($j \leq 10^9$ А/м²), достаточной для осуществления процесса необратимого, не термоактивируемого деформирования. В результате анализа вольт-амперных характеристик проводников рассчитана энергия, выделяемая при перестройке дислокационной структуры. В рамках теории пластического деформирования под действием электрического тока проведена оценка количества дислокаций, участвующих в структурных превращениях. Учтено влияние магнитного поля тока на перемещение вакансий в твердом теле. Показана возможность косвенного наблюдения структурных изменений в проводящих средах и их влияния на электросопротивление.

E-mail: svtimchenko@yandex.ru

Ключевые слова: электрический ток, электропроводимость, структура, дислокации, фольга.

Известно, что физические характеристики материала зависят от способа его изготовления и последующей обработки. В настоящее время достаточно активно изучают возможность использования электромагнитного воздействия в технологических процессах. Первые экспериментальные исследования нетеплового влияния электрического тока на физические свойства металлов были проведены еще в 1844 г. немецким ученым-исследователем Г. Вертгеймом [1]. По удлинению проволочных образцов различных металлов при постоянной внешней механической нагрузке в условиях пропускания электрического тока ($j \sim 10^7 \dots 10^8$ А/м²) либо только при термическом воздействии для фиксированной температуры образца определяли модули упругости E_1 и E_2 исследуемого материала. Наличие разности $\Delta E = E_1 - E_2$ служило доказательством нетеплового воздействия электрического тока на величину модуля упругости металла. Исследование влияния электрического тока на процесс пластического деформирования проводников позволило открыть эффект электропластической деформации (ЭПД) электропроводных металлов и сплавов [2, 3]. В процессе ЭПД металлов и сплавов за счет использования тока возникают дополнительные механические напряжения, что упрощает процесс их деформирования. Возможность реализации дополнительного разупрочнения важна при деформировании хрупких, трудно деформируемых обычными механическими способами материалов. Физической моделью ЭПД является воздействие электронной подсистемы на кристаллическую решетку

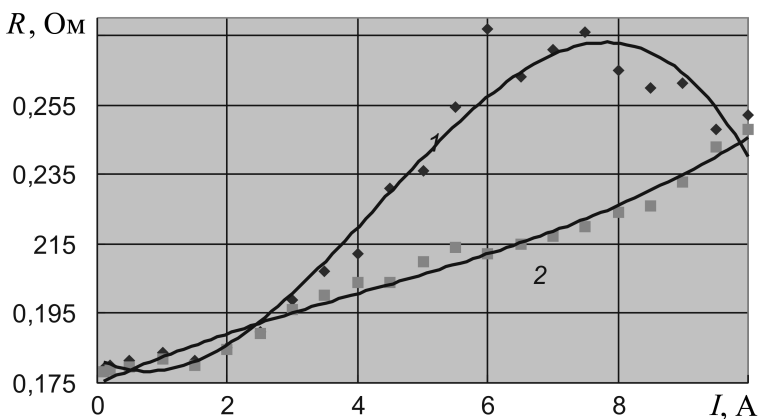


Рис. 1. Зависимость электросопротивления от силы тока для Ni-фольги:
 1 – первичная обработка; 2 – вторичная обработка

проводника, обладающую структурными неоднородностями. Движение дефектов под действием электрического тока будет влиять на физические свойства материала.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию электрического сопротивления тонких никелевых фольг и медных проволок. Обнаружена нелинейная зависимость электрического сопротивления от тока. Электропроводимость структурно неоднородных проводников исследована при высокой плотности тока ($j \leq 10^9$ А/м²), достаточной для осуществления процесса необратимого нетермоактивируемого деформирования. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) проводников (Ni – фольга, Cu – проволока) снимали при различных температурах.

На рис. 1 приведена токовая зависимость электросопротивления R для Ni-фольги (99,99 % Ni, длина 15 мм, площадь поперечного сечения $8,5 \cdot 10^{-9}$ м²) от силы тока при $T = 273$ К. Ток пропускали параллельно направлению прокатки фольги. Последовательно фиксировали ВАХ образцов, по которым получены зависимости электросопротивления от силы тока $R(I) = \frac{U(I)}{I}$ (см. рис. 1). Установлено, что зависимости $R(I)$ нелинейны, а повторная обработка приводит к уменьшению площади под кривой $R(I)$.

При первичной обработке электрическим током зависимость $R(I)$ аппроксимируется следующим выражением:

$$R_1(I) = -5 \cdot 10^{-4} I^3 + 6,9 \cdot 10^{-3} I^2 - 9,7 \cdot 10^{-3} I + 0,182.$$

Коэффициент достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9682$. При вторичной обработке электрическим током зависимость $R(I)$ аппроксимируется выражением вида

$$R_2(I) = 6 \cdot 10^{-5} I^3 - 7 \cdot 10^{-4} I^2 + 8,5 \cdot 10^{-3} I + 0,1746,$$

коэффициент достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9807$.

Фольга, используемая в эксперименте, была изготовлена прокаткой, следовательно, в ее структуре содержатся дефекты, возникшие в результате деформирования. Поскольку в данном образце имеются структурные неоднородности, то предполагается и наличие дополнительной энергии, которая будет выделяться при движении дефектов. Факт перемещения дефектов и изменение их количества можно косвенно наблюдать по изменению удельного электросопротивления. Уменьшение количества дефектов будет свидетельствовать об улучшении структуры материала, что проявляется в снижении удельного электросопротивления, увеличении прочности материала. Применяемое в данной работе воздействие электрическим током на фольгу эквивалентно операции отжига. (При традиционной термической обработке необходимо создавать неагрессивную окружающую среду или проводить вакуумирование.) Данный вид обработки позволяет исключать негативное влияние температуры, связанное в частности с окислением поверхности обрабатываемого материала.

Аналогичные эксперименты были проведены с медными проволоками. Зависимость электрического сопротивления Cu-проволоки (99,99 % Cu: диаметр 0,1 мм, длина 50 мм) от тока приведена на рис. 2: кривые 1–3 представляют три последовательные обработки медной проволоки током. Характер зависимостей $R(I)$ для фольги и проволоки в целом аналогичен. Повторные ВАХ показывают меньшее сопротивление проводников. При этом площадь, ограниченная кривой $R(I)$, уменьшается при повторных обработках (см. рис. 2).

Экспериментально доказано, что ВАХ проводников являются существенно нелинейными (см. рис. 1, 2). Степень нелинейности уменьшается при повторных обработках электрическим током. Такая зависимость сопротивления проводника от тока не укладывается в рамки теории о существовании сильной магнитодинамической нелинейности в тонких проводниках при протекании постоянного тока и диффузном рассеянии носителей на границе [4]. Согласно [4], нелинейность обусловлена доминирующим вкладом в проводимость группы эффективных электронов, сформированных магнитным полем тока. При этом нелинейность сильно выражена при токах, величины которых больше некоторого предельного значения,

$$I_{\text{пр}} = \frac{2Ddc^2 p_F \ln\left(\frac{2d}{l}\right)}{el^2}, \quad (1)$$

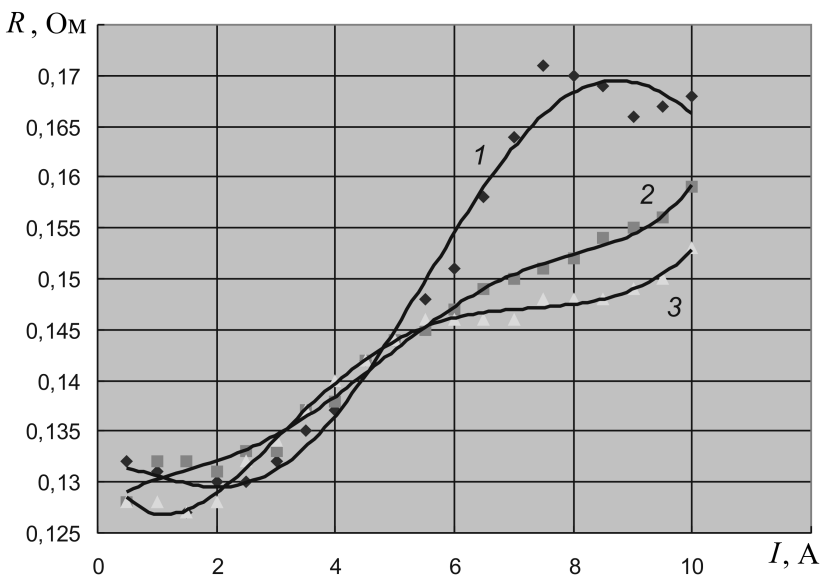


Рис. 2. Зависимость электросопротивления от силы тока для **Сu**-проволоки диаметром **0,1 мм**, длиной **50 мм**:

I – первичная; 2 и 3 – повторные обработки током соответственно

где *c* – скорость света; *pF* – импульс фермиевских электронов; *2D* – ширина и *d* – полутолщина пластины соответственно; *l* – длина свободного пробега; *e* – заряд электрона.

При $I > I_{пр}$ и $D > l > d$: $U \sim I^{1/2}$. В нашем случае нелинейность ВАХ имела более высокую степень по току, а значения тока были меньше $I_{пр}$. Несмотря на это вклад магнитного поля в электропроводность является неоспоримым. Электроны, смещаясь на расстояние порядка длины свободного пробега вдоль электрического поля тока, совершают вращательное движение под действием магнитного поля тока. Радиус кривизны электронной траектории в магнитном поле тока при неизменной скорости дрейфа уменьшается к периферийной части проводника.

Используя зависимости $R(I)$, можно вычислить энергию, запасенную в дефектах структуры и выделяющуюся при обработке электрическим током. В приближении теплоты Джоуля – Ленца данная мощность может быть вычислена как

$$\langle P \rangle = \frac{1}{I_{\max} - I_{\min}} \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} R(I) I^2 dI. \quad (2)$$

Графически вычисления, проводимые по формуле (2), эквивалентны нахождению площади фигуры, ограниченной кривыми $R(I)$ на рис. 1 и 2.

Выделение энергии системой можно выразить через мощность:

$$\Delta P = \langle P_1 \rangle - \langle P_2 \rangle, \quad (3)$$

где $\langle P_1 \rangle$ и $\langle P_2 \rangle$ — мощность, выделяемая в проводнике при первичной и вторичной обработках током соответственно.

Используя результаты аппроксимации для $R(I)$ (см. рис. 1) с учетом (3), получаем мощность $\langle P \rangle$, выделившуюся в никелевой фольге при протекании электрического тока. Изменение энергии системы, согласно (2) и (3), составило $\Delta P = 1,58$ Дж/с. Предположим, что данная энергия была запасена в дефектах кристаллической решетки поликристаллической фольги никеля. При токе $j > j_{кр}$ (в нашем случае $j_{кр} = 3 \cdot 10^8$ А/м²) начинаются необратимые изменения в структуре образца, связанные с движением дефектов. После первичной обработки образца электрическим током (см. рис. 1, 2, кривая 1) удельное сопротивление материала уменьшается (кривые 2, 3 на рис. 2).

Оценим количество дефектов, которые были удалены из объема материала в результате обработки Ni-фольги электрическим током.

Дислокации являются распространенным видом дефектов в любом поликристаллическом теле. При этом наличие дислокаций приводит к повышению свободной энергии кристалла. Избыточную свободную энергию E_0 кристалла, содержащего дислокацию, можно представить в виде [5]:

$$E_0 = E_{упр} + E_{ядр} + E_{энтр}, \quad (4)$$

где $E_{упр}$ — энергия упругого поля, создаваемого дислокацией в кристалле; $E_{ядр}$ — энергия ядра дислокации; $E_{энтр}$ — вклад энтропийного члена, который характеризует колебания атомов кристаллической решетки.

Сила, действующая на дислокацию, вводится так же, как и в механических системах: отношение изменения потенциальной энергии системы к перемещению дислокации. Дислокация будет перемещаться в том направлении, при котором работа внешних сил будет положительной, т.е. энергия системы уменьшается [5].

Энергия, выделяемая при удалении дислокаций в расчете на единицу времени,

$$\Delta P = \Delta N P_0,$$

где ΔN — количество дислокаций; $P_0 \cdot \Delta t = E_0$ — энергия, требуемая для движения одной дислокации. Изменение энергии системы $\Delta E = \Delta N P_0 \Delta t$. Тогда сила, действующая на дислокацию,

$$F = \frac{\Delta E}{\Delta N \Delta x}, \quad (5)$$

где Δx — перемещение дислокации.

Эквивалентные механические напряжения находим из отношения

$$\sigma = \frac{\Delta E}{\Delta x \Delta N b^2}. \quad (6)$$

Здесь b — вектор Бюргерса.

Предполагаем, что все структурные изменения связаны с движением дислокаций, тогда количество дислокаций ΔN в единицу времени, которые были подвергнуты действию электрического тока и участвовали в перестройке дислокационной структуры, определим из равенства

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{\Delta P}{P_0}. \quad (7)$$

Оценку количества дислокаций, испытавших движение под действием электрического тока, проведем для никелевой фольги. Согласно [5], $E_{\text{упр}} \sim 8 \dots 10$ эВ; $E_{\text{ядр}} \sim 1$ эВ; $E_{\text{энтр}} \sim 3$ кТ в расчете на атомную плоскость. Принимая $E_{\text{упр}} = 9$ эВ; $E_{\text{энтр}} = 0,08$ эВ, получаем при $\Delta P = 1,58$ Дж/с количество дислокаций, пришедших в движение под действием тока в единицу времени, $\frac{\Delta N}{\Delta t} \approx 9,8 \cdot 10^{17} \text{ с}^{-1}$.

В целом энергия, выделяемая при обработке электропроводных материалов электрическим током высокой плотности, имеет форму тепловой энергии, энергии механических деформаций, электромагнитной энергии.

Механическая энергия, выделяемая при обработке проводников электрическим током высокой плотности, может быть зарегистрирована по увеличению интенсивности акустической эмиссии [2]. Также в [6, 7] показано, что при протекании электрического тока наблюдается ориентированная рекристаллизация металлов. Характер ориентации зависит от типа кристаллической решетки исходного материала. С вектором плотности тока совпадает кристаллографическое направление, обладающее минимальным электросопротивлением для кристалла. Качественные оценки показывают, что для металлов с ОЦК-решеткой электросопротивление минимально по кристаллографическому направлению (100), а для металлов с ГЦК-решеткой — по кристаллографическому направлению (110). Например, при пропускании тока $I = 40$ А через проволоку из поликристаллического никеля (ГЦК-решетка) диаметром $d = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м и длиной $l = 80 \cdot 10^{-3}$ м, закрепленную в охлаждаемых токопроводах, образуется монокристалл с ориентацией грани (110) по оси.

Для подтверждения влияния тока высокой плотности на характеристики структуры образцы исследованы на рентгеновском дифрактометре “Дрон-1” с использованием излучения Fe K_α при длине волны $\lambda = 0,193735$ нм. Проанализированы параметры характерной

для Ni кристаллографической линии 311α , полученной на базовом образце, до и после обработки электрическим током плотностью $j = 3 \cdot 10^9$ А/м². Наблюдается уменьшение ширины линии и появление дублета, что свидетельствует об увеличении степени совершенства структуры.

Анализ дислокационной структуры, которая возникает в поликристаллическом никеле, деформированном в режиме ЭПД, и при обычном растяжении, показывает, что при электрическом токе ускоряется перестройка дислокационной структуры и облегчается процесс пересечения дислокаций. Электропластическая деформация и обработка током деформированных образцов [2] способствуют формированию мелкоблочной ячеистой структуры с более размытыми границами по сравнению с обычной деформацией.

Несмотря на то, что особенностью поликристаллических материалов является наличие в них концентрационных и структурных неоднородностей, наиболее значительные изменения дефектной структуры кристаллов связаны с перераспределением вакансий в структурно-неоднородных средах [8].

Во внешнем силовом поле микроскопические включения в кристаллах (например, поры) могут перемещаться как единое целое. Силовое поле, в котором расположено включение, может быть обусловлено различными причинами: градиентами напряжений, температуры, концентрации примесных атомов или вакансий, градиентом электрического поля и др. Например, время залечивания пор при нагреве электрическим током оказывается существенно меньше времени залечивания пор в образцах, нагретых в печи [9]. Прохождение электрического тока приводит к неоднородному распределению температуры в образце, что связано с наличием джоулевой теплоты, выделяющейся на дефектах: это нарушает равновесие вакансий. В свою очередь нарушение равновесия в распределении вакансий приводит к возникновению направленного потока вакансий. Изменение объема поры определяется потоком вакансий, их концентрацией вблизи поверхности поры.

Покажем возможность влияния на перемещение атомов (вакансий) дополнительных внешних полей. Рассмотрим случай совершения работы над системой $\delta A_{\text{вн}} = -\delta A$. Тогда основное уравнение термодинамики равновесных процессов имеет вид

$$dU = PdV + TdS. \quad (8)$$

Систему можно охарактеризовать потенциалом Гиббса:

$$G = U - PV - TS. \quad (9)$$

Здесь U — внутренняя энергия; P , V и T — давление, объем и температура соответственно; S — энтропия системы.

Вероятность перемещения атома [10]

$$W = W_{ot} \exp\left(\frac{PV}{kT}\right), \quad (10)$$

где $W_{ot} = \exp\left(\frac{TS - U}{kT}\right)$ – вероятность перемещения атома за счет термической активации; k – постоянная Больцмана. При протекании тока в проводящей среде под давлением следует учитывать магнитное давление, создаваемое в системе силами Ампера:

$$P_{\text{mag}} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}. \quad (11)$$

Таким образом, вероятность перемещения атома (10) под действием внешних сил возрастает. В частности, магнитное давление (11) как внешнее, так и внутреннее, вызванное током, будет увеличивать вероятность перемещения атома.

Частота перемещения атома в присутствии вакансии [10]

$$\nu_{\text{ат}} = W_v \nu_{vm}. \quad (12)$$

Здесь W_v и ν_{vm} – вероятность наличия вакансии и частота ее перемещения.

Принимая во внимание, что коэффициент диффузии вакансии прямо пропорционален частоте релаксации вакансий

$$D_v = \nu_v l_v^2,$$

где l_v – расстояние между источниками вакансий или величина элементарного скачка, получаем выражение для коэффициента диффузии:

$$D_a = D_v C_{vo} = D_{ao} \exp\left(-\left(\frac{U - PV}{kT}\right)\right). \quad (13)$$

Здесь $C_{vo} = \exp\left(-\frac{U_{\text{диф}}}{kT}\right)$ – равновесная концентрация вакансий; $U_{\text{диф}}$ – энергия активации процесса, равная сумме энергий образования и миграции вакансий.

В результате анализа ВАХ структурно-неоднородных проводников (Ni-фольга, Cu-проволока) при $j \leq 10^9$ А/м² установлено, что ВАХ являются существенно нелинейными. Данный интервал токов был достаточным для осуществления процесса необратимого, нетермоактивируемого деформирования. Изучение ВАХ позволило рассчитать энергию, выделяемую при перестройке дислокационной структуры. В рамках теории пластического деформирования под действием электрического тока проведена оценка количества дислокаций, участвующих в структурных превращениях. Выявлено, что при структур-

ных изменениях необходимо учитывать влияние электрического тока и магнитного поля на механизм перемещения вакансий.

Таким образом, обработка проводящих сред электрическим током высокой плотности оказывает влияние на структуру материала и, как следствие, на его свойства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. W e r t h e i m G. Annalen der Physik und Chemie. – 1848. – В. 11/11. – S. 1–114.
2. С п и ц ы н В. И., Т р о и ц к и й О. А. Электропластическая деформация металлов. – М.: Наука, 1985. – 160 с.
3. В д о в и н Е. Е., К а с у м о в А. Ю. Прямое наблюдение электропереноса дислокаций в металле // ФТТ. – 1988. – Т. 30, вып. 1. – С. 311–314.
4. О н е л и н е й н о м сопротивлении тонких металлических образцов / И.Ф. Волошин, С.В. Кравченко, Н.А. Подлевских, Л.М. Фишер // ЖЭТФ. – 1985. – Т. 89, вып. 1 (7). – С. 233–241.
5. Ф и з и к а кристаллов с дефектами / А.А. Предводителев, Н.А. Тяпунина, Г.М. Зиненкова, Г.В. Бушуева. – М.: Изд-во МГУ, 1986. – 240 с.
6. О р и е н т и р о в а н н а я рекристаллизация металлов при протекании электрического тока / В.Ф. Гордеев, А.В. Пустогаров, Я.Р. Кучеров, А.П. Холбошин // Письма в ЖТФ – 1980 – Т. 6, вып. 23. – С. 1416, 1417.
7. Д е й с т в и е электрического тока на ориентацию структуры металлов при рекристаллизации / В.Ф. Гордеев, А.В. Пустогаров, Я.Р. Кучеров и др. // Изв. СО АН СССР. Сер. Техн. науки. – 1984. – № 16, вып. 3. – С. 137–139.
8. Л ю б о в Б. Я. Диффузионные изменения дефектной структуры твердых тел // Изв. АН СССР. Металлы. – 1982. – № 1. – С. 64–79.
9. В е н г л и н с к а я С. В., К о р н ю ш и н Ю. В. К теории залечивания поры в металле под действием электрического тока // ФММ. – 1976. – Т. 41, вып. 2. – С. 431–434.
10. Г е г у з и н Я. Е. Макроскопические дефекты в металлах // М., 1962. – 252 с.

Статья поступила в редакцию 05.07.2012