

## ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПРОВОДЯЩИХ СРЕД ПРИ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ ТОКА

С.Л. Тимченко

timch@bmstu.ru

Н.А. Задорожный

nikazador@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Показан пример экспериментального исследования электрических характеристик структурно неоднородных тонкослойных проводников (никель, медь) при высокой плотности тока ( $10^8 \dots 10^9$  А/м<sup>2</sup>). Эта плотность тока в условиях интенсивного охлаждения образцов достаточна для осуществления процесса необратимого, нетермоактивируемого деформирования. Результаты эксперимента показывают, что проводящая среда при высоких плотностях тока имеет существенные нелинейности, что выражается в нелинейной зависимости электрического сопротивления образцов от плотности тока. При повторных обработках образцов током электросопротивление проводников уменьшается. Проведена оценка числа дефектов, которые были удалены из объема материала в результате обработки никелевой фольги электрическим током. Показано, что в условиях протекания постоянного электрического тока высокой плотности в микрообъемах однородных и неоднородных проводящих сред возможно появление объемного заряда. К возникновению объемного заряда в проводящей среде могут привести силы взаимодействия при движении электронов и ионов. За счет сил взаимодействия между ионами и электронами основного материала и примесей возникает локальная дополнительная ионизация, реализуемая в нанобъемах проводника. В случае неоднородной среды объемный заряд зависит от характера распределения удельной электропроводности. В однородном проводнике объемный заряд пропорционален квадрату плотности тока в образце

### Ключевые слова

*Проводящая среда, плотность электрического тока, электропроводность, вольт-амперные характеристики, расплав, кристаллизация*

Поступила 30.04.2021

Принята 03.06.2021

© Автор(ы), 2021

**Введение.** В настоящее время экспериментальное и теоретическое изучение воздействия электрического и магнитного полей на физические свойства кристаллических тел как в твердом, так и в жидком состоянии имеет широкое практическое приложение в ракурсе развития процессов обработки металлов и сплавов [1–9]. Электромагнитное поле обеспечивает нетепловое разупрочнение электропроводных материалов, которое выражается в снижении деформирующего усилия за счет резкого уменьшения сопротивления металлических кристаллов деформированию под влиянием электрического тока высокой плотности ( $j \sim 10^9$  А/м<sup>2</sup>), реализуемого в импульсном режиме. Наблюдаемый эффект назван электропластическим эффектом [1]. Такой эффект проявляется только при пластической деформации материала и нашел применение в процессах, связанных с пластической обработкой трудно деформируемых металлов и сплавов.

Использование физических методов дополнительного воздействия на сплав в процессе формирования его структуры актуально для создания современных литейных технологических процессов и дает возможность управлять процессом кристаллизации металлов и сплавов, получая отливки с требуемыми эксплуатационными свойствами [3–9]. Одним из методов воздействия является пропускание электрического тока при приготовлении расплава и его кристаллизации. Воздействие на расплав постоянного электрического тока способствует перемещению легирующих элементов под действием электрического поля тока, приводит к уменьшению газовой пористости, а также размера дендритной ячейки в силуминах и чугунах. Воздействие электрическим током приводит к повышению механических свойств материала за счет влияния электрического поля на его микроструктуру [6, 7]. Возможно, это связано с физико-химическими явлениями, протекающими на межфазной границе под воздействием электрического поля тока.

Строгой физической модели, описывающей влияние электрического тока высокой плотности на процесс электропластического деформирования, процессы фазового перехода в металлах и сплавах, пока не существует. Далее приведены результаты эксперимента по исследованию электропроводности структурно неоднородных тонкослойных проводников при высокой плотности тока, физическая модель, в которой рассматриваются условия существования объемного заряда в проводнике при высокой плотности тока.

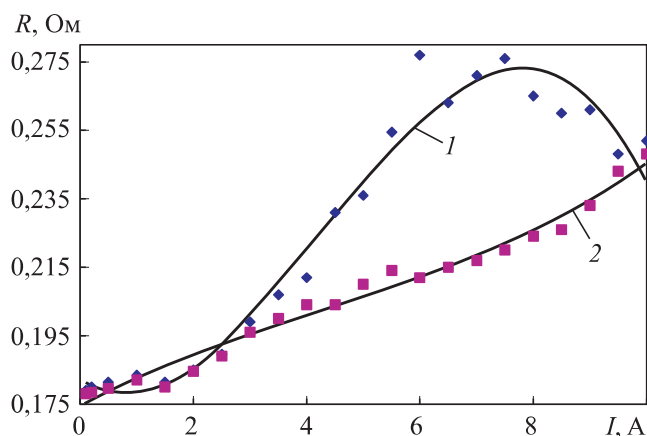
**Методика эксперимента.** Проведено экспериментальное исследование электропроводности структурно неоднородных проводников при высокой плотности тока ( $j \leq 10^9$  А/м<sup>2</sup>), достаточной для осуществления процесса не-

обратимого нетермоактивируемого деформирования. В эксперименте снимали вольт-амперные характеристики (ВАХ) проводников (Ni — фольга, Cu — проволока) при различных значениях температуры. Затем вычисляли сопротивление проводников в зависимости от силы тока:  $R = U(I) / I$ . Согласно результатам эксперимента, ВАХ проводников представляли собой существенно нелинейные зависимости  $U(I)$ . При одной и той же температуре образца были сняты последовательно его ВАХ, которые назовем первичной ВАХ, а все последующие — повторной, или вторичной. Под первичной ВАХ следует понимать получение ВАХ исходных образцов, когда ток плавно увеличивают от нулевого значения до предельно допустимого. При достижении максимального тока напряжение, подаваемое от источника на образец, обнуляли и повторяли обработку током вновь (вторичная ВАХ). При этом характер зависимости падения напряжения на образце от тока по-прежнему был нелинейным. При последующих обработках током ВАХ линейризовалась, оставаясь при этом нелинейной, но вторичные ВАХ не повторяли ВАХ образцов, полученные при первичной обработке. Значение предельного тока, при котором прекращали измерения, соответствовало значению критического тока, при котором возможно разрушение проводника. Используя модель возникновения механически напряженного состояния проводника под действием тока [10], можно вычислить предельную плотность тока, при превышении которой он разрушится. Механические напряжения, возникающие в кристаллической решетке металла и обусловленные дрейфовым движением электронов за счет приложенного к образцу электрического напряжения [10], с учетом перегрева электронов, определяют по выражению

$$\sigma_{ej} = \frac{\pi^2}{2} n_0 \frac{kT_p}{\epsilon_F} eplj \left[ 1 + \frac{2}{3} \frac{m_p}{m_e} \frac{eplj}{kT_p} \right]. \quad (1)$$

Проведенные с использованием выражения (1) оценки показывают, что для меди при  $j_{\max} \cong 1,5 \cdot 10^9$  А/м<sup>2</sup>,  $L = 10^{-2}$  м и  $T_p = 300$  К значение механических напряжений составляет  $\sigma_{ej} \cong 2 \cdot 10^8$  Н/м<sup>2</sup>. Это вполне соответствует табличному значению предела прочности металла. Таким образом, максимальное значение силы тока, пропускаемого по образцам в процессе эксперимента, не превышало его предельно допустимое значение.

**Экспериментальные результаты.** Зависимость электросопротивления  $R$  для никелевой фольги (образец: материал 99,99 % никеля, длина 15 мм, площадь поперечного сечения  $8,5 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>) от силы тока при температуре  $T = 276$  К приведена на рис. 1. Используемая в эксперименте



**Рис. 1.** Зависимость электросопротивления фольги никеля от силы тока при первичной обработке электрическим током (1) и вторичной обработке током при  $T = 276$  К (2)

фольга получена прокаткой, следовательно, ее структура содержала дефекты, структурные неоднородности, возникшие в результате технологического деформирования. Структурные неоднородности в образце предполагают и наличие дополнительной энергии, которая будет выделяться при движении дефектов. Факт движения дефектов, а точнее, изменение их числа можно косвенно регистрировать по изменению удельного электросопротивления образцов. Уменьшение числа дефектов будет свидетельствовать о совершенствовании структуры материала, в частности, это проявляется в уменьшении удельного электросопротивления материала образца и увеличении прочности материала. Пропускание электрического тока через фольгу эквивалентно по действию термическому отжигу. Экспериментальные зависимости сопротивления образцов от силы тока  $R(I)$  являются нелинейными, а вторичная обработка ВАХ приводит к уменьшению площади под кривой  $R(I)$  (см. рис. 1). В эксперименте направление электрического тока совпадало с направлением прокатки фольги. При первичной обработке никелевой фольги электрическим током зависимость электросопротивления образца от силы тока  $R(I)$  аппроксимируется выражением

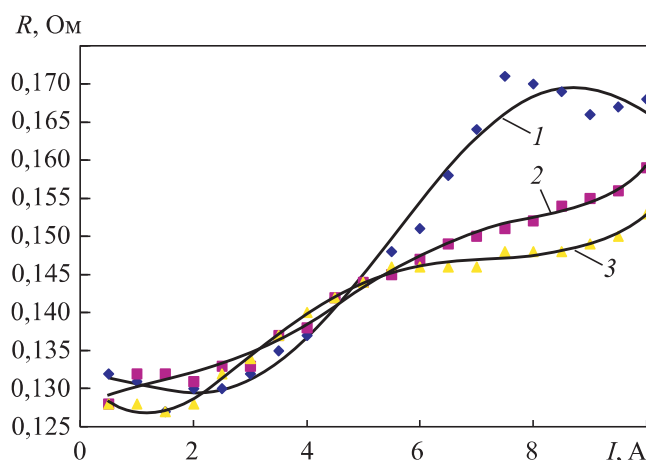
$$R_1(I) = -5 \cdot 10^{-4} I^3 + 6,9 \cdot 10^{-3} I^2 - 9,7 \cdot 10^{-3} I + 0,182$$

при коэффициенте приближения к кривой  $r^2 = 0,9682$ . При вторичной обработке ВАХ образцов электрическим током зависимость  $R(I)$  аппроксимируется выражением

$$R_2(I) = 6 \cdot 10^{-5} I^3 - 7 \cdot 10^{-4} I^2 + 8,5 \cdot 10^{-3} I + 0,1746 \text{ при } r^2 = 0,9807.$$

При вторичной обработке ВАХ (кривая 2, см. рис. 1) зависимость  $R(I)$  становится более линейной.

Аналогичные эксперименты были проведены с медными проволоками. Зависимость сопротивления медной проволоки от тока приведена на рис. 2. Параметры проволоки: диаметр 0,1 мм, длина 50 мм. Номер кривых соответствует номеру обработки. Кривые 1–3 представляют собой три последовательные обработки медной проволоки с использованием электрического тока.



**Рис. 2.** Зависимость электросопротивления медной проволоки от силы тока для первой (1), второй (2) и третьей (3) обработок электрическим током

Зависимость электросопротивления медной проволоки от силы тока при обработках током имеет нелинейный характер. Зависимость электросопротивления от силы тока для медной проволоки при первой обработке ВАХ током (кривая 1, см. рис. 2) аппроксимируется нелинейной функцией вида

$$R_1(I) = 5 \cdot 10^{-6} I^5 - 2 \cdot 10^{-4} I^4 + 0,0013 I^3 - 0,0032 I^2 + 0,0015 I + 0,1312$$

при коэффициенте приближения  $r^2 = 0,9854$ ; при второй обработке током (кривая 2, см. рис. 2):

$$R_2(I) = 5 \cdot 10^{-6} I^5 - 1 \cdot 10^{-4} I^4 + 9 \cdot 10^{-4} I^3 - 0,0026 I^2 + 0,0048 I + 0,1272$$

при  $r^2 = 0,9923$ ;

при третьей обработке током (кривая 3, см. рис. 2)

$$R_3(I) = -2 \cdot 10^{-6} I^5 + 1 \cdot 10^{-4} I^4 + 0,0013 I^3 + 0,0073 I^2 - 0,0121 I + 0,1379$$

при  $r^2 = 0,9956$ .

Заметно, что численное значение коэффициента при линейном слагаемом в зависимости  $R(I)$  возрастает при вторичных обработках током образцов и зависимость становится более линейной.

Характер зависимостей  $R(I)$  для фольги и проволоки аналогичен, зависимости являются нелинейными. При вторичных обработках образцов током электросопротивление проводников уменьшается. Площадь, ограниченная кривой  $R(I)$ , при вторичных обработках током уменьшается (см. рис. 1 и 2).

Используя зависимости  $R(I)$ , полученные на основе ВАХ, можно вычислить энергию, запасенную в дефектах структуры и выделяющуюся при обработке электрическим током. Мощность, выделяемая в образце при обработке током, может быть вычислена как

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

Для вычисления интегральной мощности использованы зависимости электросопротивления образцов от силы тока, показанные на рис. 1, 2 и полученные на основе ВАХ.

Мощность, выделяемая в проводнике при структурной перестройке

$$\Delta P = \langle P_1 \rangle - \langle P_2 \rangle.$$

Здесь  $\langle P_1 \rangle$  и  $\langle P_2 \rangle$  — мощность, выделяемая в проводнике при первичной и вторичной обработках током. Для никелевой фольги изменение мощности системы составило  $\Delta P \cong 1,58$  Дж/с.

Согласно мнению авторов настоящей работы, эта энергия может быть запасена в дефектах кристаллической решетки поликристаллической фольги никеля. При токе  $j \geq j_{\text{кр}}$  начинаются необратимые изменения в структуре образца, связанные с движением дефектов. В эксперименте критическое значение тока составило  $j_{\text{кр}} \cong 3 \cdot 10^8$  А/м<sup>2</sup>. После первичной обработки образцов электрическим током (см. рис. 1, 2) удельное сопротивление никелевой фольги снижается.

Проведем оценку числа дефектов, которые были удалены из объема материала в результате обработки никелевой фольги электрическим током высокой плотности. Рассмотрим в качестве дефектов дислокации, которые являются наиболее распространенным видом дефектов в твердом теле. Электрическая мощность, выделяемая при удалении дислокаций:  $\Delta P = \Delta N P_0$ , где  $\Delta N$  — число дислокаций;  $P_0$  — мощность, выделяемая при удалении (перемещении) одной дислокации. Тогда энергия,

требуемая на перемещение одной дислокации,  $P_0 \Delta t = E_0$ . Изменение энергии всей системы  $\Delta E = \Delta N P_0 \Delta t$ .

Присутствие дислокаций приводит к повышению свободной энергии кристалла. Избыточную свободную энергию кристалла, содержащего дислокацию, можно представить как [11]:

$$E_0 = E_y + E_{я} + E_{э}.$$

Здесь  $E_y$  — энергия упругого поля, создаваемого дислокацией в кристалле;  $E_{я}$  — энергия ядра дислокации;  $E_{э} \cong 3kT$  — вклад энтропийного члена, который характеризует колебания атомов кристаллической решетки. При температуре проводников более 0 вклад энтропийного члена является доминирующим по сравнению с энергией упругого поля дислокации и энергией ядра дислокации в кристалле. При температуре 300 К избыточная свободная энергия кристалла составляет  $E_0 \cong 16,12 \cdot 10^{-19}$  Дж.

Предполагая, что все структурные изменения связаны с движением дислокаций, число дислокаций  $\Delta N$  в единицу времени, которые были подвергнуты действию электрического тока и участвовали в перестройке дислокационной структуры, определим по формуле

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{\Delta P}{E_0}.$$

Согласно оценке, число дислокаций, пришедших в движение под действием электрического тока в единицу времени для никелевой фольги, составило  $\Delta N / \Delta t \approx 9,8 \cdot 10^{17} \text{ с}^{-1}$ . Таким образом, исследование электрических свойств структурно неоднородных проводников в условиях интенсивного охлаждения при высокой плотности тока ( $j \leq 10^9 \text{ А/м}^2$ ), достаточной для осуществления процесса необратимого, нетермоактивируемого деформирования, показывает возможность косвенного наблюдения структурных изменений в проводящих средах и их влияния на электросопротивление.

Неоднородная среда также реализуется при получении отливок, подвергнутых действию электрического тока в процессе кристаллизации, за счет теплообмена образца с литейной формой.

На возникновение анизотропии электросопротивления меди при пропускании тока высокой плотности указано в [12, 13], также была обнаружена анизотропия электросопротивления в сплаве АК12 при его кристаллизации в условиях пропускания постоянного электрического тока [14]. Таким образом, при протекании тока активизируется движение дефектов структуры и возможно возникновение анизотропии физических свойств.

**Физическая модель.** Далее рассмотрены условия существования объемного заряда в проводнике и получено выражение для объемной плотности электрического заряда в однородном проводнике с током. Пусть по однородному проводнику протекает постоянный электрический ток плотностью  $j$ . Согласно выводам одномерной задачи Друде — Лоренца, плотность тока пропорциональна скорости дрейфа носителей:  $\vec{j} = en\vec{v}_{др}$ ,  $n$  — концентрация электронов  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;  $v_{др}$  — скорость дрейфа электронов в проводнике. Уравнение непрерывности для случая постоянного тока имеет вид

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0. \quad (2)$$

Поле в проводнике при электропроводности складывается из кулоновского потенциального поля  $E_0$ , определяемого взаимодействием электронов проводимости с ионным остовом проводника, и лоренцева поля  $\vec{E}_л = [\vec{v}_{др}, \vec{B}]$ ,  $\vec{B}$  — вектор магнитной индукции. Поэтому суммарное электрическое поле в проводнике при постоянном токе определяется двумя слагаемыми:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + [\vec{v}_{др}, \vec{B}].$$

Аналитическое выражение для закона Ома эффективного тока в проводнике при постоянном токе имеет вид

$$\vec{j} = \bar{\sigma} E = \sigma (\vec{E}_0 + [\vec{v}_{др}, \vec{B}]).$$

Тогда уравнение непрерывности для случая постоянного тока примет вид

$$\operatorname{div} (\sigma \vec{E}_0 + \sigma [\vec{v}_{др}, \vec{B}]) = 0.$$

Полагая материальные характеристики проводящей среды  $\epsilon$ ,  $\mu$ ,  $\sigma$  пространственно однородными, получаем

$$\frac{\sigma}{\epsilon_0} \operatorname{div} (\epsilon_0 \vec{E}_0) + \sigma \operatorname{div} [\vec{v}_{др}, \vec{B}] = 0;$$

$$\epsilon_0 \operatorname{div} [\vec{v}_{др}, \vec{B}] = -\rho \sigma.$$

Таким образом, возникновение объемного заряда в однородном проводнике возможно за счет действия на движущиеся носители заряда в проводящей среде магнитного поля, характеризуемого вектором магнитной индукции  $\vec{B}$ . Магнитное поле может быть обусловлено как токами проводящей среды  $\vec{B}_j$ , так и внешними источниками  $\vec{B}_0$ . Поэтому в общем случае  $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_j$ . Если принять, что  $\operatorname{rot} \vec{j} = 0$ , то



$$\varepsilon_0 \operatorname{div}[\vec{v}_{\text{др}}, \vec{B}] = -\frac{\varepsilon_0}{en} \mu_0 (\vec{j}, \operatorname{rot} \vec{H}).$$

Учитывая, что магнитное поле в рассматриваемом примере создается токами проводимости, т. е.  $\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j}$ , получаем выражение для объемной плотности электрического заряда

$$\rho_{\sigma} = \frac{\varepsilon_0 \mu_0}{en} j^2. \quad (3)$$

Наличие объемного заряда в проводнике в процессе электропроводности приводит к возникновению электрического поля. Тогда электрическое поле в изотропном проводнике цилиндрической формы при высоких значениях плотности тока следует определять по выражению

$$\vec{E}(j) = \rho_0 j \vec{n} + \frac{\rho_0 \gamma \alpha_{\rho}}{\alpha_T} j^2 \vec{n} + \frac{r}{2\varepsilon_0 en c^2} j^2 \vec{e}_r. \quad (4)$$

Здесь  $\rho_0$  — начальное удельное электросопротивление проводника;  $\alpha_{\rho}$ ,  $\alpha_T$  — температурные коэффициенты электросопротивления и удлинения;  $\gamma$  — гальваноупругий коэффициент [15, 16]. В выражении (4) первые два слагаемых определяют напряженность потенциального электростатического поля в проводящей среде на постоянном токе и имеют в основном только продольную составляющую [16], третье слагаемое — напряженность поля за счет действия силы Лоренца на носители тока. Существенно, что деформации проводника за счет силы Лоренца являются квадратичными по току в отличие от электроупругих деформаций [15, 16].

Рассмотрим случай неоднородной проводящей среды, которая может иметь место, например, при наличии градиента температуры или механических деформаций. Если проводящая среда, у которой  $\mu > 1$ , является неоднородной, то уравнение непрерывности для постоянного тока (2) запишется в виде

$$\frac{\sigma}{\varepsilon_0} \operatorname{div}(\varepsilon_0 \vec{E}_0) + (\vec{E}_0 \operatorname{grad} \sigma) + \frac{\mu \mu_0}{en} \{([\vec{j}, \vec{H}], \operatorname{grad} \sigma) + \sigma \operatorname{div}[\vec{j}, \vec{H}]\} = 0.$$

В силу невихревой природы постоянного тока  $\operatorname{rot} \vec{j} = 0$  получаем выражение для объемной плотности электрического заряда в проводящей неоднородной среде из ферромагнетика по постоянному току:

$$\rho_{\sigma} = -\frac{\varepsilon_0}{\sigma} (\vec{E}_0 \operatorname{grad} \sigma) - \frac{\varepsilon_0 \mu \mu_0}{en \sigma} \{([\vec{j}, \vec{H}], \operatorname{grad} \sigma) - \sigma j^2\}. \quad (5)$$

Таким образом, наличие неоднородностей, дефектов структуры в проводящей среде на локальном уровне будет приводить к появлению объемного

электрического заряда, который будет релаксировать и вызывать дополнительные микротоки. С одной стороны, согласно выражению (5), за счет наличия градиента удельной электропроводности будет иметь место дополнительная объемная плотность заряда, которая тривиальна. С другой стороны, вопрос о поведении электрических характеристик при высокой плотности тока в экспериментальном плане и в плане создания строгой физической модели — вопрос, на который нет пока однозначного ответа и он открыт для исследования. С учетом того, что в эксперименте зарегистрированы интегральные характеристики образцов и получена нелинейная зависимость электросопротивления образца от плотности тока, можно сделать вывод, что локальная неоднородность физических свойств проявляется в интегральных характеристиках образцов. Для того чтобы ввести связь результирующего электрического поля и плотности тока, требуется учет вклада напряженности поля локальных областей.

**Обсуждение полученных результатов.** Для неоднородного проводника первое слагаемое в (5) имеет максимальное значение при коллинеарности векторов  $\vec{E}_0$  и  $\text{grad } \sigma$ . Второе слагаемое отлично от нуля при наличии поперечного градиента удельной электропроводности и магнитной проницаемости. Третье слагаемое является квадратичным по току и обусловлено действием магнитной составляющей силы Лоренца на «свободные» электроны в проводнике. Для случая однородной среды выражение (5) преобразуется к выражению (3) и объемная плотность электрического заряда пропорциональна квадрату плотности тока.

Объемная плотность заряда как в однородном, так и в неоднородном проводнике может возникать именно локально, а поэтому в микрообъемах и нанообластях проводника будет оказано дополнительное влияние электрического поля на ионы атомов основного элемента и ионы атомов примесей. Такое влияние электрического тока на движение ионов алюминия и кремния наблюдалось в силуминах, в частности в сплаве АК12 [14], и которое нельзя объяснить в рамках классической теории электропроводности.

Величина объемного заряда в случае неоднородной среды зависит от характера распределения удельной электропроводности, а в однородном проводнике пропорциональна квадрату плотности тока. Неоднородная среда реализуется при получении отливок, подвергнутых действию электрического тока в процессе кристаллизации, в результате теплообмена образца с литейной формой. К возникновению объемного заряда в проводящей среде могут привести силы взаимодействия при движении электронов и ионов. За счет сил взаимодействия между ионами и элек-

тронами основного материала и примесей возникает дополнительная ионизация, которая происходит в нанобъемах проводника.

Электрическое поле вызывает направленные диффузионные потоки ионов в металлах и сплавах, приводящие к перемещению дислокаций, активизируя процесс растворения пор. Являясь стоками или местами зарождения дислокаций, межфазные граничные области влияют на движение дислокаций и определяют формирование свойств сплава. Влияние электрического поля на диффузионные перескоки ионов кристалла связано с силами, которые действуют на диффундирующий ион. Поскольку вероятности перескоков в направлении действия силы и в противоположном направлении оказываются различными, возникает направленный диффузионный электроперенос ионов металла [17].

**Заключение.** Электрический ток является источником электрической, магнитной, механической и тепловой энергии, поэтому применение таких воздействий целесообразно и эффективно в процессах обработки электрическим током высокой плотности металлов и сплавов, при кристаллизации сплавов, позволяет непосредственно влиять на процесс формирования кристаллической структуры и управлять формированием свойств сплава. Согласно результатам экспериментальных исследований, проводящая среда при высоких плотностях тока имеет существенные нелинейности, которые выражаются в нелинейной зависимости электрического сопротивления металлов при высокой плотности тока. Локальная анизотропия удельного сопротивления проводника приводит к возникновению объемного электрического заряда, формирующего электрические поля в объемах проводящей среды.

Воздействие электрического поля имеет более широкие масштабы, например, электрические токи текут в биологических тканях. В природе и биологическом морфогенезе важную роль играет механизм Тьюринга [18]. Паттерны Тьюринга показывают пространственный дрейф ионов, вызванный электрическим полем. Электрическое поле определяет результирующую скорость дрейфа паттернов, а переориентация паттернов индуцируется их градиентом, генерируемым электрическим током — распределением электрического поля в неоднородных структурах.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Баранов Ю.В., Троицкий О.А., Авраамов Ю.С. и др. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработки и новые материалы. М., МГИУ, 2001.

- [2] Conrad H., Karam N., Mannan S., et al. Effect of electric current pulses on the recrystallization kinetics of copper. *Scr. Metall.*, 1988, vol. 22, iss. 2, pp. 235–238. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0036-9748\(88\)80340-5](https://doi.org/10.1016/S0036-9748(88)80340-5)
- [3] Деев В.Б., Селянин И.Ф., Башмакова Н.В. и др. Влияние электрического тока на кристаллизацию алюминиевых сплавов, содержащих железо. *Литейщик России*, 2007, № 8, с. 12–15.
- [4] Деев В.Б., Селянин И.Ф., Нохрина О.И. и др. Модифицирующая обработка сплавов магнитным полем. *Литейщик России*, 2008, № 3, с. 23–25.
- [5] Деев В.Б., Селянин И.Ф., Ри Хосен и др. Эффективные технологии обработки расплавов при получении литейных алюминиевых сплавов. *Литейщик России*, 2012, № 10, с. 19–21.
- [6] Тимченко С.Л., Кобелева Л.И., Задорожный Н.А. Влияние электрического тока на структуру и свойства алюминиевого сплава. *Физика и химия обработки материалов*, 2011, № 6, с. 82–87.
- [7] Timchenko S.L., Zadorozhnyj N.A. Change in the structure of the aluminium alloy under the action of direct electric current. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2019, vol. 683, art. 012044. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/683/1/012044>
- [8] Лаптев А.Б., Первухин М.В., Афанасьев-Ходыкин А.Н. и др. Электроперенос ионов легирующих элементов в алюминиевых сплавах магнитогидродинамической обработкой расплава. *Журнал СФУ. Техника и технологии*, 2017, т. 10, № 8, с. 1031–1041.
- [9] Коробова Н.В., Аксененко А.Ю., Тарасов Ф.Е. и др. Об электромагнитном воздействии на расплав алюминия при его модифицировании. *Металлургия машиностроения*, 2013, № 1, с. 8–11.
- [10] Сидоренков В.В. О механизме текстурирования металлов под действием электрического тока. *ДАН СССР*, 1989, т. 308, № 4, с. 870–873.
- [11] Предводителей А.А., Тяпунина Н.А., Зиненкова Г.М. и др. Физика кристаллов с дефектами. М., Изд-во МГУ, 1986.
- [12] Гордеев В.Ф., Пустогаров А.В., Кучеров Я.Р. и др. Ориентированная рекристаллизация металлов при протекании электрического тока. *Письма в ЖТФ*, 1980, т. 6, № 23, с. 1416–1417.
- [13] Гордеев В.Ф., Пустогаров А.В., Кучеров Я.Р. и др. Действие электрического тока на ориентацию структуры металлов при рекристаллизации. *Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук*, 1984, т. 16, № 3, с. 137–139.
- [14] Тимченко С.Л. Исследование кристаллизации сплава под действием электрического тока. *Расплавы*, 2011, № 4, с. 53–61.
- [15] Сидоренков В.В., Тимченко С.Л. О физической природе феноменологического закона электропроводности металлов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 1994, № 2, с. 110–119.
- [16] Корнев Ю.В., Сидоренков В.В., Тимченко С.Л. О физической природе закона электропроводности металлов. *ДАН*, 2001, т. 380, № 4, с. 472–475.

[17] Гегузин Я.Е. Макроскопические дефекты в металлах. М., Металлургиздат, 1962.

[18] Dähmlow P., Müller S.C. Pattern formation in microemulsions affected by electric fields. In: Müller S., Plath P., Radons G., Fuchs A. (eds). *Complexity and Synergetics*. Cham, Springer, 2018, pp. 117–128.

DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-64334-2\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-64334-2_10)

**Тимченко Светлана Леонидовна** — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Задорожный Николай Антонович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Тимченко С.Л., Задорожный Н.А. Электропроводность проводящих сред при высокой плотности тока. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2021, № 6 (99), с. 64–78. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2021-6-64-78>

**CONDUCTING MEDIUM ELECTRICAL CONDUCTIVITY  
AT HIGH CURRENT DENSITY**

**S.L. Timchenko**

timch@bmstu.ru

**N.A. Zadorozhny**

nikazador@bmstu.ru

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

**Abstract**

The experimental research example of electrical characteristics of structurally heterogeneous thin-layer conductors (nickel, copper) at high current density ( $10^8$ – $10^9$  A/m<sup>2</sup>) is shown. This current density in conditions of the samples intensive cooling is sufficient for the process of irreversible, nonthermally activated deformation. The experiment results show that the conducting medium at high current density has essential nonlinearities expressed in nonlinear dependence of the samples electrical resistance from current density. With repeated current treatments of the samples the conductors' electrical resistivity decreases. The number of defects removed from the volume of material as a result of nickel foil treatment by electric current is estimated. It is shown that under conditions of high-

**Keywords**

*Conducting medium, electric current density, electrical conductivity, volt-ampere characteristics, melt, crystallization*

density direct electric current flow in microvolumes of homogeneous and inhomogeneous conducting media a volume charge can appear. The appearance of the volume charge in a conducting medium can be caused by interaction forces during the motion of electrons and ions. Due to the interaction forces between ions and electrons of basic material and impurities, additional local ionization occurs which is realized in nano-volumes of a conductor. In the case of heterogeneous medium, the volume charge depends on the nature of the specific conductivity distribution. In a homogeneous conductor the volume charge is proportional to the square of the current density in the sample

Received 30.04.2021

Accepted 03.06.2021

© Author(s), 2021

---

## REFERENCES

- [1] Baranov Yu.V., Troitskiy O.A., Avraamov Yu.S., et al. Fizicheskie osnovy elektroimpul'snoy i elektroplasticheskoy obrabotki i novye materialy [Physical fundamentals of electropulse and electroplastic processing and new materials]. Moscow, MGIU Publ., 2001.
- [2] Conrad H., Karam N., Mannan S., et al. Effect of electric current pulses on the recrystallization kinetics of copper. *Scr. Metall.*, 1988, vol. 22, iss. 2, pp. 235–238. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0036-9748\(88\)80340-5](https://doi.org/10.1016/S0036-9748(88)80340-5)
- [3] Deev V.B., Selyanin I.F., Bashmakova N.V., et al. Effect of electric current on the crystallization of aluminum alloys containing iron. *Liteyshchik Rossii*, 2007, no. 8, pp. 12–15 (in Russ.).
- [4] Deev V.B., Selyanin I.F., Nokhrina O.I., et al. Modifying treatment of alloys by magnetic field. *Liteyshchik Rossii*, 2008, no. 3, pp. 23–25 (in Russ.).
- [5] Deev V.B., Selyanin I.F., Ri Khosen, et al. Efficient technologies of melts treatment when producing the aluminum alloys. *Liteyshchik Rossii*, 2012, no. 10, pp. 19–21 (in Russ.).
- [6] Timchenko S.L., Kobeleva L.I., Zadorozhnyy N.A. Effect of electric current on the structure and properties of Al alloy. *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Physics and Chemistry of Materials Treatment], 2011, no. 6, pp. 82–87 (in Russ.).
- [7] Timchenko S.L., Zadorozhnyj N.A. Change in the structure of the aluminium alloy under the action of direct electric current. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2019, vol. 683, art. 012044. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/683/1/012044>
- [8] Laptev A.B., Pervukhin M.V., Afanas'yev-Khodykin A.N., et al. Electric transfer of ions of alloying elements in aluminum alloys by magnetohydrodynamic melt processing. *Zhurnal SFU. Tekhnika i tekhnologii* [Journal of SibFU. Engineering & Technologies], 2017, vol. 10, no. 8, pp. 1031–1041 (in Russ.).

- [9] Korobova N.V., Aksenenko A.Yu., Tarasov F.E., et al. Prospects of application of electromagnetic impact on melt under introduction of modifying additives during crystallization. *Metallurgiya mashinostroeniya*, 2013, no. 1, pp. 8–11 (in Russ.).
- [10] Sidorenkov V.V. On mechanism of texturing metals under electric current impact. *DAN SSSR*, 1989, vol. 308, no. 4, pp. 870–873 (in Russ.).
- [11] Predvoditelev A.A., Tyapunina N.A., Zinenkova G.M., et al. *Fizika kristallov s defektami* [Physics of crystals with defects]. Moscow, MSU Publ., 1986.
- [12] Gordeev V.F., Pustogarov A.V., Kucherov Ya.R., et al. Oriented recrystallization of metals under electric current flow. *Appl. Phys. Lett.*, 1980, vol. 6, no. 23, pp. 1416–1417.
- [13] Gordeev V.F., Pustogarov A.V., Kucherov Ya.R., et al. Effect of electric current on the orientation of metal structure during recrystallization. *Izv. SO AN SSSR. Ser. tekhn. nauk*, 1984, vol. 16, no. 3, pp. 137–139 (in Russ.).
- [14] Timchenko S.L. Investigation of crystallization of alloy under the action of electrical current. *Rasplavy* [Melts], 2011, no. 4, pp. 53–61 (in Russ.).
- [15] Sidorenkov V.V., Timchenko S.L. On physical nature of phenomenological law for metals electrical conductivity. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 1994, no. 2, pp. 110–119 (in Russ.).
- [16] Kornev Yu.V., Sidorenkov V.V., Timchenko S.L. The physical nature of the electric-conduction law for metals. *Dokl. Phys.*, 2001, vol. 46, no. 10, pp. 690–693.  
DOI: <https://doi.org/10.1134/1.1415580>
- [17] Geguzin Ya.E. *Makroskopicheskie defekty v metallakh* [Macroscopic defects in metals]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1962.
- [18] Dähmlow P., Müller S.C. Pattern formation in microemulsions affected by electric fields. In: Müller S., Plath P., Radons G., Fuchs A. (eds). *Complexity and Synergetics*. Cham, Springer, 2018, pp. 117–128.  
DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-64334-2\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-64334-2_10)

**Timchenko S.L.** — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Assoc. Professor, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Zadorozhny N.A.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Timchenko S.L., Zadorozhny N.A. Conducting medium electrical conductivity at high current density. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2021, no. 6 (99), pp. 64–78 (in Russ.).  
DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2021-6-64-78>