

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-286-296>
УДК 669.2/8:620



Оригинальная статья

В. С. Савенко*, Чэнь Янцзы

*Мозырский государственный педагогический университет имени И. П. Шамякина,
ул. Студенческая, 28, 247760, Мозырь, Гомельская область, Республика Беларусь*

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛЮМИНИЯ
ПУТЕМ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ**

Аннотация. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований электропластического волочения (ЭПВ) электротехнического алюминия на промышленном многоходовом стане. Рассмотрено влияние импульсного тока плотностью $\sim 10^3$ А/мм² и длительностью $\sim 10^{-4}$ с на реализацию ЭПВ в деформационном узле с волокой, нагруженной выше предела текучести, в условиях возбуждения электронной подсистемы металла, и показана принципиальная возможность управления деформационными процессами для улучшения физико-механических свойств технического алюминия. Выявлено, что в условиях электропластичности за счет пондеромоторных эффектов в зоне деформации с периодичностью импульсов тока на фронте их нарастания создается ультразвуковая вибрация, которая обуславливает дополнительные механические напряжения остова кристаллической решетки и активно влияет на кинетику пластической деформации, что способствует улучшению характеристик. Области технологического применения ЭПВ являются сверхтонкое, тонкое волочение проволоки (до диаметра ~ 1 мм), прокатка тонкого листа, вытяжка и штамповка материала. Указанные технологии обеспечивают выпуск самой массовой продукции металлообрабатывающей промышленности.

Ключевые слова: алюминий, электропластическая деформация, пондеромоторное действие тока, пинч- и скин-эффекты, импульсный ток, собственное магнитное поле, вихревое электрическое поле, поле Холла, микротвердость

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Савенко Владимир Семенович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики и математики Мозырского государственного педагогического университета имени И. П. Шамякина. E-mail: savenko.vladimir195@gmail.com; Чэнь Янцзы – аспирант кафедры физики и математики Мозырского государственного педагогического университета имени И. П. Шамякина. E-mail: 494650763@qq.com

Вклад авторов: Савенко Владимир Семенович – обоснование концепции, разработка методологии исследования, систематизация данных, написание текста рукописи, формулировка выводов; Чэнь Янцзы – проведение инструментального исследования, сбор данных.

Для цитирования: Савенко, В. С. Повышение эксплуатационных характеристик алюминия путем электропластической деформации / В. С. Савенко, Чэнь Янцзы // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 4. – С. 286–296. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-286-296>

Поступила в редакцию: 06.12.2023

Доработанный вариант: 16.10.2024

Утверждена к публикации: 16.12.2024

Подписана в печать: 23.12.2024

Original article

Vladimir S. Savenko*, Chen Yangzi

*Mozyr State Pedagogical University named after I. P. Shamyakin,
28, Studencheskaya Str., 247760, Mozyr, Gomel Region, Republic of Belarus*

**IMPROVING THE OPERATING CHARACTERISTICS OF ALUMINIUM
BY ELECTROPLASTIC DEFORMATION**

Abstract. The article presents the results of theoretical and experimental studies of electroplastic deformation by drawing (EPD) of electrical aluminum on an industrial multi-pass mill. The influence of a pulsed current with a density of $\sim 10^3$ A/mm² and a duration of $\sim 10^{-4}$ s on the implementation of EPT in a deformation unit loaded above the yield limit, under conditions of excitation of the electronic subsystem of the metal, is considered, and the fundamental possibility of programmed

control of deformation processes for modifying the physical and mechanical properties of technically important materials is shown. It was revealed that under conditions of electroplasticity, due to ponderomotive effects in the deformation zone, with the periodicity of current pulses at the front of their increase, ultrasonic vibration is created, causing additional mechanical stresses of the crystal lattice skeleton and actively influencing the kinetics of plastic deformation with improving the service characteristics of the material. The areas of technological application of EPV are drawing of ultra-fine, thin wire (up to ~ 1 mm in diameter), rolling of thin sheets, drawing and stamping of material. The installed technologies correspond to the most widespread production in the metalworking industry.

Keywords: aluminum, electroplastic deformation, ponderomotive action of current, pinch and skin effect, pulsed current, intrinsic magnetic field, vortex electric field, Hall field, microhardness

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interests.

Information about the authors: *Vladimir S. Savenko* – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Physics and Mathematics Department at Mozyr State Pedagogical University named after I. P. Shamyakin. E-mail: savenko.vladimir195@gmail.com; *Chen Yangzi* – Graduate Student of the Physics and Mathematics Department at Mozyr State Pedagogical University named after I. P. Shamyakin. E-mail: 494650763@qq.com

Contribution of the authors: *Vladimir S. Savenko* – concept development, research methodology, systematization of data, writing the text of the manuscript, formulation of conclusions; *Chen Yangzi* – carrying out instrumental research, collecting data.

For citation: Savenko V. S., Chen Yangzi. Improving the operating characteristics of aluminium by electroplastic deformation. *Vestsi Natsyyanal' nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 4, pp. 286–296 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-286-296>

Received: 06.12.2023

Modified: 16.10.2024

Approved for publication: 16.12.2024

Signed to the press: 23.12.2024

Введение. В настоящее время перспективным направлением развития физики твердого тела и физического материаловедения является создание высокоинтенсивных технологий для получения материалов с комплексом высоких физико-механических и эксплуатационных характеристик.

Не связанное с тепловым действием тока явление прямого действия электрического тока высокой плотности на пластическую деформацию металла (электропластический эффект, ЭПЭ) было обнаружено О. А. Троицким при действии одиночными импульсами тока плотностью ~ 10^5 A/cm^2 и длительностью ~ 10^{-4} с на деформацию кристаллов цинка растяжением и сжатием [1]. Эффект проявлялся в скачкообразном характере удлинения образцов при прохождении по ним импульса тока без какого-либо существенного теплового эффекта и тепловой дилатации. Исследователь высказал предположение, что в основе нового эффекта лежит ускорение пластического течения металла потоком электронов проводимости, которые, помимо джоулевого эффекта, способны оказывать специфическое электропластическое действие на металл, находящийся под механическими напряжениями выше предела текучести. Г. Конрад с соавторами наблюдали ЭПЭ с аналогичными параметрами тока на образцах титана, ряд других авторов исследовали широкий спектр проводящих металлов при различных видах пластической деформации, включая сложно-напряженное состояние [2–4].

Электропластичность обуславливает ряд факторов вторичного силового пондеромоторного действия импульсного тока на пластическую деформацию металла, таких как пинч- и скин-эффекты, возникающие под влиянием собственного магнитного поля тока и поляризации электронной подсистемы металла с созданием поперечного электрического поля Холла, которое препятствует дальнейшему сжатию электронной плазмы. Холловское поле, действуя на ионный остов кристаллической решетки металла с периодичностью подачи импульсов тока на фронте их нарастания, создает ультразвуковую вибрацию и активно влияет на кинетику пластической деформации с модификацией эксплуатационных характеристик материала [5–8].

Реализация электропластического волочения (ЭПВ) предоставила возможность изменять кинетику пластической деформации для улучшения эксплуатационных характеристик технически важных материалов, что создает новые решения для управления деформационными процессами в металлах с помощью высокоэнергетических воздействий при электропластической деформации металлов (ЭПДМ) за счет возникающих сил немеханической природы.

При производстве кабельно-проводниковой продукции для получения медной алюминиевой проволоки, к которой предъявляются высокие требования по электрическим и механическим свойствам, целесообразно применять электропластическое волочение. К преимуществам ЭПВ

можно отнести: возможность позонного воздействия на материал и интенсификацию технологического процесса с получением материалов с периодически измененными свойствами, экологическую чистоту метода и его энергоэкономичность, высокую скорость и эффективность воздействия, а также возможность комбинирования процесса волочения с джоулевым эффектом с достижением практически любых сопутствующих температур. ЭПВ предоставляет возможность упрощения производства алюминиевой проволоки путем замены стандартной технологии волочения на электропластическое с исключением из технологического процесса части операций отжига для улучшения физико-механических характеристик, на которые требуются большие временные и энергетические затраты. Энергетические затраты на электропластическое волочение невелики. Так, для проволоки диаметром 0,64 мм затрачиваемая мощность не превышает 1 кВт. Одним из недостатков технологии ЭПВ является, ограничение по скоростям деформации. Если учесть, что скорость дрейфа электронов определяется напряженностью электрического поля E , тогда средний импульс, действующий на остов кристаллической решетки по направлению дрейфа электронов и упруго взаимодействующих с узлами кристаллической решетки, определяется следующим образом:

$$I_e = m_e V_F = e E t_e,$$

где m_e – масса электрона, t_e – время свободного пробега между столкновениями, e – заряд электрона; $E = I/\lambda$ (I – плотность тока, λ – проводимость).

При этом следует учитывать скорость деформации материала, которая не должна превышать скорость дрейфа электронов V_F :

$$V_F \cong \frac{J}{en} \cong 0,5 - 1 \text{ м/с},$$

где n – концентрация электронов в единице объема металла.

Также к недостаткам относится невозможность применения ЭПВ при волочении и прокатке заготовок больших сечений из-за сложности создания в зоне деформации плотности тока 10^3 А/мм^2 , при которой реализуется электропластический эффект.

Алюминий и его сплавы являются одними из самых применяемых металлов в разных отраслях современной промышленности, например, авиационной, машиностроения, электротехнической и др. В связи с этим исследования технологии ЭПВ актуальны и представляют большой научный и практический интерес для улучшения эксплуатационных характеристик изделий из электротехнического алюминия, в частности для создания облегченных высокопроводящих кабелей с улучшенными механическими и электрическими свойствами, которые особенно востребованы в аэрокосмической и авиационной отраслях, а также проволоки из магнитотвердой стали, изделий из вспененного алюминия, нанотрубок из углерода.

Цель работы – исследовать физические и технологические условия создания высокоэнергетических воздействий при электропластическом волочении проволоки из электротехнического алюминия на стандартном многоходовом промышленном волочильном стане для получения изделий с комплексом высоких физико-механических и эксплуатационных характеристик.

Методика исследования. Алюминиевую катанку марки АКЛП-5ПТ с максимальным сечением 196 мм^2 ($d = 14 \text{ мм}$) подвергали ЭПВ на промышленном многоходовом волочильном стане СМВ-1-9М4 (рис. 1) в условиях стандартного технологического процесса.

В процессе электропластической деформации волочением осуществлялся подвод импульсного тока длительностью 10^{-4} с и плотностью $J_m = 10^3 \text{ А/мм}^2$ в узел зоны деформации алюминиевой проволоки для каждой волоки (максимальное количество волок – 9), установленной на волочильном стане согласно технологическому маршруту. Импульсы тока подавались генератором импульсного тока мощностью 70 кВт с частотой следования 600–800 Гц [9]. Электрическое сопротивление каждого технологического контактного узла ЭПВ при натянутой алюминиевой проволоке не превышало значения $R = 0,005 \text{ Ом}$.

Применялись следующие режимы волочения: обычное волочение без подвода тока; ЭПВ с импульсным током, пропускаемым через зону деформации, при полярности плюс источника тока до зоны деформации; то же с обратной полярностью минус источника тока до зоны деформации.

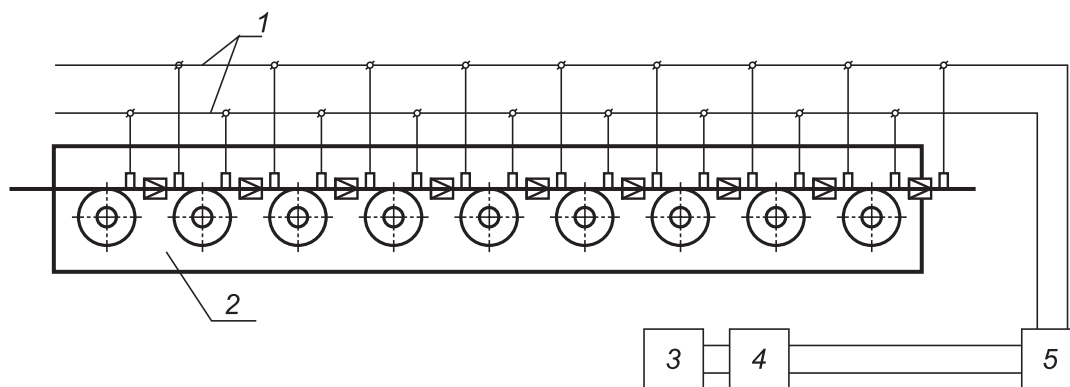


Рис. 1. Блок-схема волочильного стана: 1 – шины, 2 – волочильный стан СМВ-1-9МЧ, 3 – пульт управления волочильного стана, 4 – пульт управления генератора импульсного тока, 5 – генератор импульсного тока

Fig. 1. Block diagram of the drawing mill: 1 – tises, 2 – SMV-1-9MH drawing mill, 3 – drawing mill control panel, 4 – pulse current generator control panel, 5 – pulse current generator

Электрическое сопротивление метровых образцов проволок измерялось по мостовой компенсационной схеме на УПИП-60М (класс точности 0,1), а удельное электросопротивление рассчитывалось по усредненному диаметру проволоки для каждого технологического перехода с учетом степени обжатия, измеренного электронным микрометром (с точностью до 1 мкм).

Механические свойства – разрывное усилие и относительное удлинение – измерялись на разрывной машине РМУ-0,05 с точностью 1 % (относительное удлинение определялось на базе 200 мм).

В соответствии с ГОСТ 6132-63 «Проволока алюминиевая круглая электротехническая» (URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294768/4294768292.pdf>) исследовались служебные характеристики алюминиевой проволоки: временное сопротивление разрыву (G , кг/мм²), относительное удлинение (%), количество перегибов для каждого диаметра (n).

На рис. 2 показаны зависимости количества n от истинного сужения $L_i = d_0/d_n$ (d_0 – начальный диаметр проволоки, d_n – диаметр проволоки после технологического перехода на маршруте волочения при различных режимах пропускания импульсного тока).

Результаты исследования и их обсуждение. Нами установлено, что наложение импульсного тока на зону деформации во время ЭПВ алюминия приводит к увеличению количества перегибов в 3 раза при полярности тока плюс до деформационного узла (рис. 2).

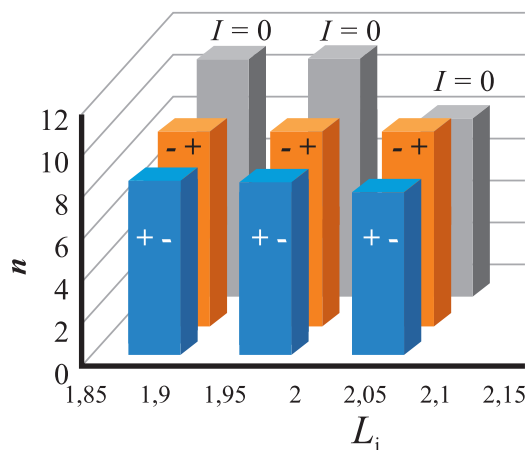


Рис. 2. Зависимость количества перегибов (n) от истинного сужения (L_i)

Fig. 2. Dependence of the number of kinks (n) on the true narrowing (L_i)

С увеличением количества технологических переходов на маршруте волочения глубина обработки материала током растет, происходит накопление электропластического действия тока с уменьшением диаметра проволоки и увеличением плотности тока. Данный эффект наиболее выражен при плюсовой полярности источника тока до зоны деформации.

Этот вывод подтверждает и зависимость временного сопротивления G от истинного сужения L_i . Из рис. 3 видно, что при электропластической деформации на последнем технологическом переходе временное сопротивление разрыву при плюсовой полярности тока до зоны деформации более чем в 2 раза меньше, чем без тока.

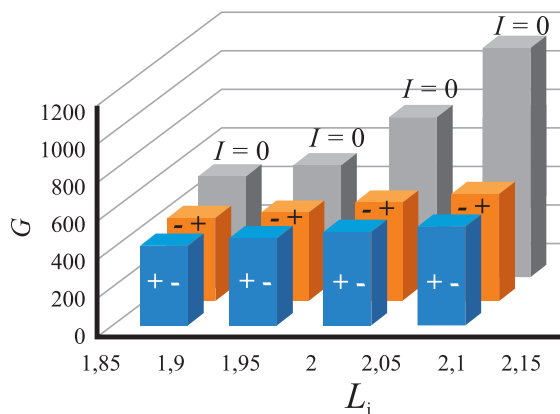


Рис. 3. Зависимость временного сопротивления (G) от истинного сужения (L_i)

Fig. 3. Dependence of temporary resistance (G) on true contraction (L_i)

Электропластическое волочение также влияет на важные эксплуатационные характеристики электротехнических проводящих кабелей – относительное удлинение Δl и удельное электрическое сопротивление алюминиевой проволоки ρ (рис. 4, 5).

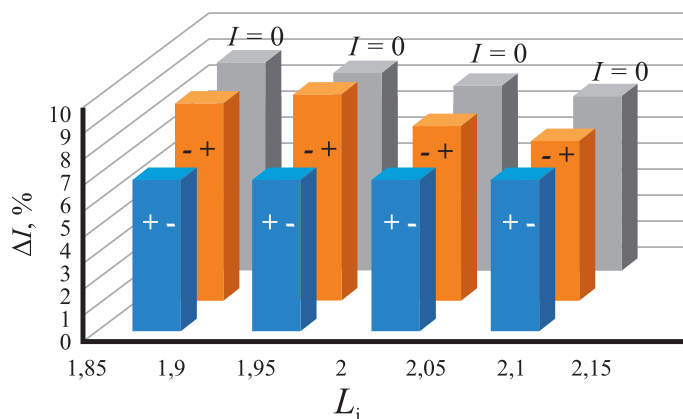


Рис. 4. Зависимость относительного удлинения (Δl) от истинного сужения (L_i)

Fig. 4. Dependence of relative elongation (Δl) on true contraction (L_i)

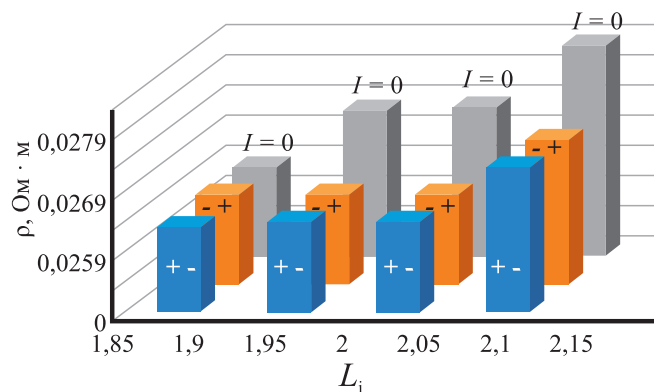


Рис. 5. Зависимость удельного сопротивления (ρ) от истинного сужения (L_i)

Fig. 5. Dependence of resistivity (ρ) on true contraction (L_i)

Полученные результаты электропластического волочения электротехнической алюминиевой проволоки выявили улучшение эксплуатационных характеристик изделий относительно ГОСТ 6132-63. Это предоставляет возможность интенсифицировать технологический процесс, уменьшить энергетические затраты, так как при ЭПВ увеличивается пластичность материала, уменьшается предел текучести, что снижает мощность на тяговом барабане волочильного стана и экономит энергоресурс.

Важным эффектом ЭПВ является снижение металлоемкости электротехнических кабелей и получение облегченных проводов с меньшим диаметром за счет улучшения характеристик удельного электросопротивления (см. рис. 5), что играет определяющую роль в аэрокосмической и авиационной промышленности.

Из полученных результатов можно заключить, что наложение импульсного тока большой плотности на зону деформации выше предела текучести при ЭПВ обуславливает создание пондеромоторных эффектов и осцилляций деформирующих усилий, что приводит в итоге к изменению кинетики деформации. В зоне деформационного узла происходит образование и размножение дефектов с уменьшением стартовых напряжений движения дислокаций и увеличением пластичности материала.

При ЭПВ носители тока, в зависимости от полярности, движутся в направлении деформации или в противоположную сторону. Если направление движения электронов совпадает с составляющей вектора деформации, то электрон-дислокационное взаимодействие стимулирует движение и размножение дефектов, увеличение амплитуды колебания дислокаций и срыв их со стопоров в направлении волочения с ростом пластичности [10–12].

В обратном направлении, от минуса к плюсу, в деформационной зоне электроны затормаживают движение дефектов или действуют только термически, что обуславливает перераспределение электронной плотности носителей и дислокаций леса [9, 12, 13].

Динамическое действие электрического импульса вызывает также процесс механического удара, который переходит в затухающие виброколебания после начала каждого из фронтов электрического импульса. Виброакустические отклики характеризуются противофазной формой для различных фронтов, а их максимальное действие совпадает с интервалом времени, соответствующим максимальному значению магнитного поля. Такие параметры, как ускорение, динамическая сила, действующая вдоль оси проводника, и величина магнитной индукции у его поверхности позволяют провести анализ происходящих физических процессов на основе результатов эксперимента (рис. 6). Магнитная индукция вокруг проводника сравнительно медленно увеличивается, начиная от момента начала электрического импульса (t_0) и спадает после его окончания в момент t_1 . В моменты t_0 и t_1 формируются ударные механические перегрузки с максимальной амплитудой, знак которых определяется полярностью ступенчатого изменения электрического напряжения на фронте электрического импульса, который вызывает распространение в материале проводника, а также затухающие виброакустические колебания. Действие электрического импульса на каждом из фронтов обуславливает формирование импульса силы в продольном направлении, знак которого также определяется знаком ступенчатого изменения напряжения на каждом из фронтов.

Такая модель физического механизма ЭПЭ позволяет сделать выбор параметров электрического воздействия и регулировать как процесс преобразования электроимпульсного воздействия в механический ударно-волновой процесс, так и его характеристики, например, за счет суперпозиции колебаний, создаваемых при действии переднего и заднего фронтов электрического импульса.

Для определения микроструктуры образцов проводилось сканирование поверхности материала на электронном микроскопе Hitachi Table Microscope TM 000 сфокусированным высокоэнергетическим тонким электронным лучом с возбуждением исследуемой области, который генерирует, увеличивает и отображает физическую информацию (рис. 7).

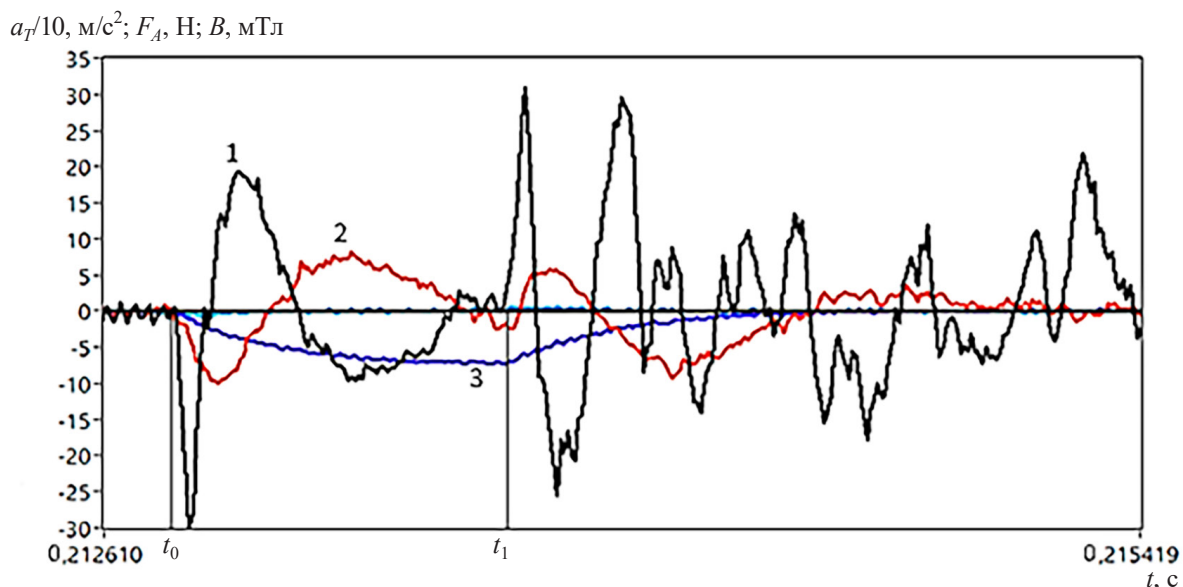


Рис. 6. Динамика ускорения в поперечном направлении (a_T , кривая 1), осевой динамической силы (F_A , кривая 2) и кольцевой компоненты магнитной индукции у поверхности (B , кривая 3) для проводника из меди диаметром 3 мм и длиной 160 мм в разные моменты электрического импульса (от t_0 до t_1)

Fig. 6. Dynamics of acceleration in the transverse direction (a_T , curve 1), axial dynamic force (F_A , curve 2) and annular magnetic induction components at the surface (B , curve 3) for a copper conductor with a diameter of 3 mm and a length of 160 mm. Electric pulse duration is from t_0 to t_1

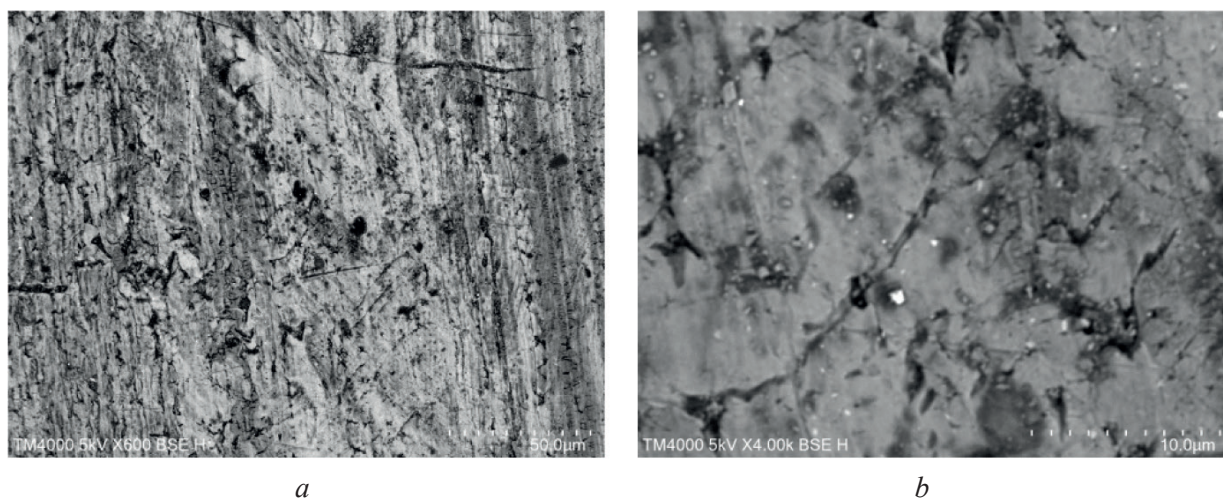


Рис. 7. Электропластическое волочение, на технологическом переходе 2,98–2,64 мм, скорость $V = 0,5$ м/с:
 a – без тока; b – с током полярностью плюс минус, $J_m = 10^3$ А/мм² и длительностью $\sim 10^{-4}$ с

Fig. 7. Electroplastic drawing with polarity, at a technological transition of 2.98–2.64 mm, $V = 0.5$ m/s: a – without current; b – with current polarity plus minus, $J_m = 10^3$ A/mm² and duration $\sim 10^{-4}$ s

Во время процесса ЭПВ при прохождении импульсного тока через деформационный узел происходит выделение мгновенной мощности в зоне деформации металла, которая достигает значений 10^3 – 10^4 кВт/см³. Это стимулирует структурно-фазовые превращения, изменяет микроструктуру материала на мелкозернистую с зонами рекристаллизации и субзернами, что приводит к циклическому упрочнению и интенсифицирует технологический процесс, усиливает эффекты «размытия» субграниц и дислокационной плотности, уменьшает энергопотребление и металлоемкость изделия, снижает усилия деформации и приводит к технологически важным результатам [11].

Для определения зернистости образцов при электропластическом волочении выполнен расчет предела текучести для изменений среднего размера зерна в условиях ЭПВ при наличии набора препятствий для движения дислокаций в соответствии соотношением Холла–Петча:

$$\sigma_T = \sigma_0 + kd_{cp}^{-\frac{1}{2}},$$

где d_{cp} – средний размер зерна; σ_0 – сопротивление движению дислокаций в материале; k – коэффициент Холла–Петча. Для алюминия: $\sigma_0 = 10$ МПа, $k = 0,06$ МПа · м^{1/2}.

Из полученных данных следует, что электропластическая деформация волочением уменьшает средний размер зерен (таблица), структура становится мелкозернистой и равновесной, что улучшает механические свойства алюминиевой проволоки. При ЭПВ процессе происходит дробление зерен, увеличиваются зеренные границы, что приводит к росту пластичности и уменьшению предела текучести. При деформации плюс источника тока до деформационной зоны реализуется более интенсивное измельчение микроструктуры и электропластичность проходит при значительных микроискажениях.

Расчет номера зерна
Calculation of the grain number

Номер образца	m_1	m_2	m	m_{cp}	$S_{cp}, \text{мм}^2 \cdot 10^{-5}$	$d_{cp}, \text{мм}$	Номер зерна	$\sigma_T, \text{МПа}$
1 (без тока)	54	31	69,5	31 275	3,197	0,00 565	4	10,798
2 (с током)	107	47	130,5	58 725	1,703	0,004 127	5	10,936

Примечание: d_{cp} – средний диаметр зерна; m_1 – количество целых зерен; m_2 – количество зерен, перерезанных окружностью; m_{cp} – среднее количество зерен на площади шлифа S_{cp} ; m – общее количество зерен ($m = m_1 + 0,5m_2$).

Note: d_{cp} – the average diameter of the grain; m_1 – the number of whole grains; m_2 – the number of grains cut by a circle; m_{cp} – the average number of grains on the area of the S_{cp} slot; m – the total number of grains ($m = m_1 + 0,5m_2$).

Полученные экспериментальные и теоретические результаты металлографического анализа микроструктуры алюминия и проведенные расчеты по формуле Холла–Петча показали существенное влияние ЭПВ на микрозернистую структуру образцов и модификацию свойств материала.

Следует учесть фактор временно заторможенных скоплений дислокаций с возможным усилением их взаимодействий со стопорами, в качестве которых могут выступать парамагнитные примеси, а также дефекты решетки в виде дислокации леса. В алюминии существуют электронно-структурные объекты элементарных возбуждений на линиях дислокаций, парамагнитные центры.

Микротвердость образцов исследовалась на цифровом микротвердомере Micro Met 5114 с сенсорным LCD пультом управления с помощью программного обеспечения Altami Studio 3.4 и с автоматическим расчетом значений твердости с накоплением статистики при помощи алмазной пирамидки (Виккерс) с вариацией приложения нагрузки 15 с. Нагрузка на индентор составляла $P = 1000$ г, угол алмазной пирамидки был равен $\theta = 136^\circ$. Индентирование проводилось перпендикулярно плоскости шлифа в ортогональном направлении вектора деформации. После снятия нагрузки измерялась диагональ отпечатка (d). Число твердости по Виккерсу (HV) вычислялось как отношение нагрузки (P) к площади поверхности пирамидального отпечатка (S):

$$HV = k \frac{P}{S} = 0,102 \frac{2P \frac{\sin \theta}{2}}{d^2} = 0,1891 \frac{P}{d^2}.$$

В ходе измерения диагонали в зависимости от P получили глубину отпечатка для исследуемых образцов. Эти данные позволили получить графические изображения некоторых кинематических характеристик при анализе зависимости значения микротвердости HV от нагрузки с вариациями продолжительности деформации (t) с током (рис. 8, *a*) и без тока (рис. 8, *b*).

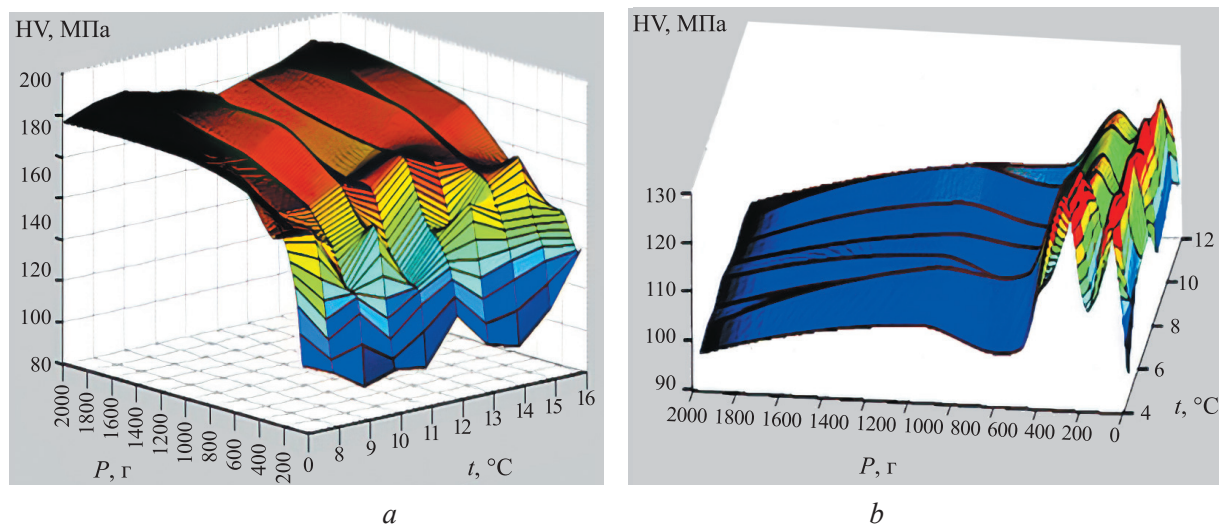


Рис. 8. Зависимость микротвердости HV от нагрузки (P) с вариациями продолжительности деформации:
 a – с током; b – без тока

Fig. 8. Dependence of microhardness HV on load P with variations in deformation duration:
 a – with current; b – without current

Из графиков видно, что при электропластическом волочении микротвердость уменьшается, увеличивается электропластичность без значительного изменения прочности и улучшаются служебные характеристики изделия.

Заключение. Возбуждение электронной подсистемы металла при реализации электропластичности в алюминиевом образце, нагруженном выше предела текучести, обуславливает возникновение деформационных процессов за счет осцилляций деформирующих усилий. Электропластическое волочение способствует увеличению амплитуды колебаний дислокаций с периодическим изменением позиции дислокационных петель, что стимулирует отрыв дислокаций от стопоров, а также приводит к возникновению пондеромоторных эффектов, обуславливающих виброакустические колебания и дополнительные механические напряжения кристаллической решетки в различных направлениях.

Электропластическая деформация волочением электротехнического алюминия с импульсами тока высокой плотности 10^3 А/мм² и длительностью 10^{-4} с в зоне деформирования выше предела текучести изменяет микроструктуру материала на мелкозернистую с зонами рекристаллизации и субзернами, что приводит к циклическому упрочнению. Под влиянием импульсов тока наиболее неравновесные группы дислокаций положительного знака открепляются от препятствий безактивационным путем. Группы же дислокаций отрицательного знака открепляются от стопоров только термофлуктуационным путем и трансформируют микроструктуру материала.

В ходе исследования установлено, что ЭПВ улучшает физико-механические и эксплуатационные характеристики материала по сравнению с нормативными (см. ГОСТ 6132-63). Увеличиваются относительное удлинение, количество перегибов, незначительно падает временное сопротивление. Важным технологическим фактором электропластического волочения является снижение удельного электрического сопротивления, что предоставляет возможность уменьшить сечения провода без изменения электротехнических параметров в соответствии с ГОСТ и снизить металлоемкость алюминиевого кабеля. ЭПВ также позволяет исключить из технологического процесса энергозатратный отжиг, который применяется для улучшения электротехнических и механических характеристик, что упрощает технологию изготовления алюминиевой проволоки с улучшенными служебными характеристиками путем замены обычного волочения электропластическим. Предложенная технология ЭПВ по сравнению с обычной уменьшает металлоемкость изделия, снижает усилия деформации, это позволяет не только снизить энергетические затраты, но и повысить ресурс стана, в том числе износостойкость деформационных деталей волок.

Полученные результаты можно применить при волочении, для получения электротехнических кабелей с улучшенными эксплуатационными характеристиками, прокатке тонкого листа, ленты, ультразвуковой ковке, вытяжке, штамповке и других технологических процессах обработки металлов давлением.

Список использованных источников

1. Троицкий, О. А. Электромеханический эффект в металлах / О. А. Троицкий // Письма в ЖЭТФ. – 1969. – Т. 10, № 1. – С. 18–22.
2. Okazaki, K. The electroplastic effect in titanium [Electronic resource] / K. Okazaki, M. Kagawa, H. Conrad. – Mode of access: https://cdn.ymaws.com/titanium.org/resource/resmgr/ZZ-WTCP1980-VOL1/1980_Vol.1-6-The_Electroplas.pdf
3. Molotskii, M. Dislocation paths in a magnetic field / M. Molotskii, V. Fleurov // J. Phys. Chem. B. – 2000. – Vol. 104, № 16. – P. 3812–3816. <https://doi.org/10.1021/jp993259g>
4. Sprecher, A. F. Overview no. 49: On the mechanisms for the electroplastic effect in metals / A. F. Sprecher, S. L. Mannan, H. Conrad // Acta Met. – 1986. – Vol. 34, № 7. – P. 1145–1162. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(86\)90001-5](https://doi.org/10.1016/0001-6160(86)90001-5)
5. Molotskii, M. Plasticity of ferromagnets near the Curie point / M. Molotskii, V. Fleurov // Philos. Mag. A. – 2003. – Vol. 83, № 12. – P. 1421–1430. <https://doi.org/10.1080/01478643031000078495>
6. Троицкий, О. А. Фундаментальные и прикладные исследования электропластической деформации металлов / О. А. Троицкий, В. С. Савенко. – Минск: ИВЦ Минфина, 2013. – 375 с.
7. Molotskii, M. Magnetic effects in electroplasticity of metals / M. Molotskii, V. Fleurov // Phys. Rev. B. – 1991. – Vol. 52, № 22. – P. 311–317. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.52.15829>
8. Savenko, V. S. Electroplastic effect under the simultaneous superposition and magnetic fields / V. S. Savenko // J. Appl. Phys. – 1999. – Vol. 86, № 5. – P. 2479–2482. <https://doi.org/10.1063/1.371080>
9. Влияние высокоэнергетических воздействий на модификацию физико-механических характеристик стали / В. С. Савенко [и др.] // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. – 2020. – № 3. – С. 65–75. <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2020-3-65-75>
10. Савенко, В. С. Вклад пондеромоторных факторов в реализацию электропластической деформации / В. С. Савенко, О. А. Троицкий, А. Г. Силивонец // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 1. – С. 85–91.
11. Savenko, V. S. Electroplastic deformation by twinning metals / V. S. Savenko // Acta Mechanica et Automatic. – 2018. – Vol. 12, № 4. – P. 6–12. <https://doi.org/10.2478/ama-2018-0039>
12. Батаронов, И. Л. О влиянии электрического тока и магнитного поля на взаимодействие дислокаций с точечными дефектами в металлах / И. Л. Батаронов, А. М. Рошупкин // Физика твердого тела. – 1988. – Т. 30, № 11. – С. 3311–3318.
13. Воздействия импульсами тока и СВЧ-изучением на конструкционные материалы. Электродинамические и электрохимические эффекты в проводниках / О. А. Троицкий [и др.]. – М.: Ким Л. А., 2019. – 278 с.

References

1. Troitskii O. A. Electromechanical effect in metals. *Pis'ma v Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki = JETP Letters*, 1969, vol. 10, pp.18–22 (in Russian).
2. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. *The electroplastic effect in titanium*. Available at: https://cdn.ymaws.com/titanium.org/resource/resmgr/ZZ-WTCP1980-VOL1/1980_Vol.1-6-The_Electroplas.pdf
3. Molotskii M., Fleurov V. Dislocation paths in a magnetic field. *Journal of Physical Chemistry B*, 2000, vol. 104, no. 16, pp. 3812–3816. <https://doi.org/10.1021/jp993259g>
4. Sprecher A. F., Mannan S. L., Conrad H. Overview no. 49: On the mechanisms for the electroplastic effect in metals. *Acta Metallurgica*, 1986, vol. 34, no. 7, pp. 1145–1162. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(86\)90001-5](https://doi.org/10.1016/0001-6160(86)90001-5)
5. Molotskii M., Fleurov V. Plasticity of ferromagnets near the Curie point. *Philosophical Magazine A*, 2003, vol. 83, no. 12, pp. 1421–1430. <https://doi.org/10.1080/01478643031000078495>
6. Troitskii O. A., Savenko V. S. *Fundamental and Applied Studies of Electroplastic Deformation of Metals*. Minsk, Information and Computing Center of the Ministry of Finance, 2013. 375 p. (in Russian).
7. Molotskii M., Fleurov V. Magnetic effects in electroplasticity of metals. *Physical Review B*, 1991, vol. 52, no. 22, pp. 311–317. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.52.15829>
8. Savenko V. S. Electroplastic effect under the simultaneous superposition and magnetic fields. *Journal of Applied Physics*, 1999, vol. 86, no. 5, pp. 2479–2482. <https://doi.org/10.1063/1.371080>
9. Savenko V. S., Troitskiy O. A., Hrushchov M. M., Stashenko V. I., Zernitsa D. A. Effects of high energy on steel structure in deformation. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Fizika = Journal of the Belarusian State University. Physics*, 2020, no. 3, pp. 65–75 (in Russian). <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2020-3-65-75>
10. Savenko V. S., Troickij O. A., Silivonec A. G. The contribution of ponderomotive factors in implementation of electroplasticity deformation. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2017, no. 1, pp. 85–91 (in Russian).

11. Savenko V. S. Electroplastic deformation by twinning metals. *Acta Mechanica et Automatic*, 2018, vol. 12, no. 4, pp. 6–12. <https://doi.org/10.2478/ama-2018-0039>
12. Bataronov I. L., Roshchupkin A. M. On the influence of electric current and magnetic field on the interaction of dislocations with point defects in metals. *Solid State Physics*, 1988, vol. 30, no. 11, pp. 3311–3318.
13. Troitskii O. A., Stashenko V. I., Savenko V. S. *Impact of Current Pulses and Microwave Studies on Structural Materials. Electrodynamic and Electrochemical Effects in Conductors*. Moscow, Kim L. A. Publ., 2019. 278 p. (in Russian).