

**RESEARCH OF TRANSIENT PROCESSES UNDER THE INFLUENCE
OF HIGH-DENSITY PULSED CURRENT ON METAL SAMPLES MADE
OF COPPER AND ALUMINUM TO STIMULATE
ELECTROPLASTIC DEFORMATION**

*Mariya Nikolaevna Semenova ^{1a}, Yuri Vladimirovich Bebikhov ¹,
Ilya Anatolyevich Yakushev ¹, Alexander Sergeevich Semenov ^{2,3}*

¹ Ammosov North-Eastern Federal University, Mirny Polytechnic Institute, 14 Oyunsky st., 678174 Mirny, Russia

² Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Western Yakut Scientific Center, 5/1 Tikhonov st., 678175 Mirny, Russia

³ Institute of Molecules and Crystals Physics, Ufa Federal Research Center of RAS, 71 Oktyabrya Ave., 450054 Ufa, Russia

^a mariya_semyonova86@mail.ru

ABSTRACT

The work is devoted to the study of transient processes under the influence of high-density pulsed current on metal samples made of copper and aluminum to stimulate electroplastic deformation (EPD). These processes are directly related to the electroplastic effect, which is manifested in a decrease in the resistance of metal to plastic deformation and an increase in its plasticity when passing high-density current pulses under mechanical stress above the yield point. Since copper and aluminum are used in the mass production of wires, choosing the optimal parameters for stimulating the EPD of these metals is a particularly important task. A mathematical model has been developed that includes the sequential solution of three related problems: electromagnetic, thermal, and mechanical. A step-by-step implementation of the model in the MATLAB software package is presented. Using the geometric parameters of the samples in the form of copper and aluminum wires, their physical properties and current pulse parameters, the final code of the computer model was compiled in MATLAB. As a result of the simulation, graphs of the average wire temperature, Mises tension, wire deformation, and current density were obtained. Based on the conducted research, practical recommendations for stimulating EPD are proposed, which are reduced to the optimal choice of parameters, the need for temperature control and a decrease in current density or frequency when the temperature exceeds 400 K.

KEYWORDS

Electroplastic deformation; electroplastic effect; pulse current; Joule heating; metals and alloys; transient process; tension; temperature; mathematical model; MatLab.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНЫМ ТОКОМ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ОБРАЗЦЫ ИЗ МЕДИ И АЛЮМИНИЯ ДЛЯ СТИМУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

*Мария Николаевна Семёнова ^{1а}, Юрий Владимирович Бебихов ¹,
Илья Анатольевич Якушев ¹, Александр Сергеевич Семёнов ^{2,3}*

¹ Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова в г. Мирном, Россия, 678174 Мирный, ул. Ойунского, 14

² Западно-Якутский научный центр Академии наук Республики Саха (Якутия), Россия, 678175 Мирный, ул. Тихонова, 5/1

³ Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН, Россия, 450054 Уфа, пр. Октября, 71

^а mariya_semyonova86@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена вопросам исследования переходных процессов при воздействии импульсным током высокой плотности на металлические образцы из меди и алюминия для стимулирования электропластической деформации (ЭПД). Эти процессы напрямую связаны с электропластическим эффектом, который проявляется в снижении сопротивления металла пластической деформации и увеличении его пластичности при пропускании импульсов тока высокой плотности в условиях механического нагружения выше предела текучести. Поскольку медь и алюминий используются в массовом производстве проводов, выбор оптимальных параметров при стимулировании ЭПД этих металлов является особенно важной задачей. Разработана математическая модель, включающая последовательное решение трёх связанных задач: электромагнитной, тепловой и механической. Представлена пошаговая реализация модели в пакете программ MatLab. Используя геометрические параметры образцов в виде медной и алюминиевой проволоки, их физические свойства и параметры импульса тока, был составлен окончательный код компьютерной модели в MatLab. В результате моделирования получили графики средней температуры проволоочных образцов, напряжения по Мизесу, деформации проволоки и плотности тока. На основании проведённого исследования предложены практические рекомендации для стимулирования ЭПД, сводящиеся к оптимальному выбору параметров, необходимости контроля температуры и снижения плотности тока или частоты при превышении температуры 400 К.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Электропластическая деформация; электропластический эффект; импульсный ток; джоулев нагрев; металлы и сплавы; переходной процесс; напряжение; температура; математическая модель; MatLab.

Введение

Исследование переходных процессов при воздействии импульсным током на металлы и сплавы для стимулирования электропластической деформации (ЭПД) связан с изучением динамических изменений в

структуре, механических свойствах и энергетических потоках материала в момент и после прохождения импульса тока [1]. Электропластический эффект (ЭПЭ) проявляется в снижении сопротивления металла пластической деформации и увеличении его пластич-

ности при пропускании импульсов тока (ИТ) высокой плотности в условиях механического нагружения выше предела текучести. Этот эффект был открыт советским ученым О.А. Троицким более 50 лет назад [2], и изучался им в соавторстве с другими учеными на протяжении долгих лет [3–6], вплоть до распада Советского Союза, после чего их разработки были необоснованно забыты. Следует отметить, что менее чем через 10 лет после открытия Троицкого, его результат подтвердила группа американских ученых под руководством Г. Конрада [7].

В последние годы интерес к изучению ЭПЭ возрос, в том числе и среди российских ученых. Изучаются как теоретические основы ЭПЭ [8–10], так и прикладное применение электроимпульсной обработки (ЭИО) для стимулирования ЭПД [11–13]. Наиболее активное практическое применение ЭИО находит в таких технологических операциях, как формовка [14, 15], штамповка [16], прокатка [17], а также при сварке металлов давлением [18], для повышения эксплуатационных характеристик [19] и коррозионной стойкости металлов и сплавов [20].

К основным механизмам переходных процессов для стимулирования ЭПД при воздействии ИТ можно отнести следующие [21]:

1. Пондеромоторное действие тока. Импульсный ток создает собственное магнитное поле, которое взаимодействует с электронным потоком. Это приводит к радиальному сжатию образца (пинч-эффект) и возбуждению виброакустических колебаний кристаллической решетки. Колебания способствуют увеличению амплитуды колебаний дислокаций и их отрыву от стопоров, что стимулирует пластическую деформацию [22].

2. Электронный ветер. Направленное движение электронов при высокой плотности тока (порядка $10^5 \div 10^6$ А/см²) оказывает дополнительное воздействие на дислокации, ускоряя их движение и снижая стартовые напряжения для срыва дислокаций со стопоров. Это влияет на кинетику пластической деформации [23].

3. Скин-эффект. При высокочастотном токе возникают вихревые токи, которые препятствуют равномерному распределению плотности тока по поперечному сечению проводника. В результате плотность тока на оси образца оказывается меньше, чем у поверхности. Это влияет на распределение механических напряжений и деформацию [24].

4. Поле Холла. Под влиянием собственного магнитного поля тока происходит поляризация электронной подсистемы металла в приповерхностных областях. Возникает поперечное электрическое поле Холла, которое препятствует дальнейшему сжатию электронной плазмы и создает дополнительные механические напряжения [25].

5. Локальный нагрев. Хотя основной механизм ЭПЭ нетепловой, при прохождении импульса тока происходит локальный Джоулев нагрев в местах скопления дефектов кристаллической решетки (дислокации, границы зерен). Это облегчает их движение и перестройку. Однако при оптимальной длительности импульсов (порядка 10^{-5} с) нагрев не приводит к существенному изменению температуры образца [26].

6. Спиновое разупрочнение. Последние исследования указывают на возможное влияние спиновых эффектов и электронного парамагнитного резонанса на механические свойства металла [27].

К изучаемым переходным процессам, протекающим во времени, при воздействии ИТ для стимулирования ЭПД будут относиться следующие: фронт импульса, период действия импульса, затухание колебаний, послеимпульсный период. Ключевыми параметрами, влияющими на переходные процессы, будут являться: плотность тока (J , А/м²), длительность импульса (τ , с), частота импульсов (f , Гц), механические напряжения (σ , Па).

При пропускании ИТ через образец, нагруженный выше предела текучести, наблюдаются осцилляции деформирующих усилий. Контроль динамических воздействий выполняется измерением ускорений образца

с применением пьезоэлектрических датчиков. Исследования показывают, что величина ЭПД увеличивается с увеличением растягивающего напряжения, но относительная деформация образца уменьшается с каждым последующим ИТ до насыщения [28].

Исследование переходных процессов позволяет оптимизировать параметры ИТ (плотность, длительность, частота) для достижения максимального эффекта при минимальной вероятности перегрева. Это важно для обработки труднодеформируемых материалов (титановые сплавы, жаропрочные никелевые сплавы, высокопрочные стали) в таких процессах, как прокатка, волочение, штамповка.

Таким образом, переходные процессы при электропластической деформации – это сложное взаимодействие электромагнитных, механических и структурных изменений в материале, требующее детального изучения для эффективного применения в промышленности. Этому и будет посвящена настоящая работа.

1. Методы и методики

Для исследования процессов, происходящих в материале при действии ИТ, воспользуемся методом компьютерного моделирования. Анализ переходных процессов при воздействии ИТ на металлы и сплавы для стимулирования ЭПД с помощью компьютерного моделирования требует комплексного подхода, сочетающего физико-математические модели, численные методы и специализированное программное обеспечение. Такой подход позволяет учитывать многофакторность процесса, включая электромагнитные, тепловые и механические эффекты [29]. Для решения этих задач хорошо подойдет пакет программ MatLab [30]. Сначала необходимо описать процессы, происходящие в материале при действии импульсного тока, с помощью систем уравнений, в которые обычно включают уравнения электродинамики (например, уравнения Максвелла для описа-

ния электромагнитных полей); уравнения теплопроводности (для учета Джоулева нагрева и теплопереноса); уравнения механики сплошного тела (для описания деформаций и напряжений), учитывающие пластичность и возможные фазовые превращения [31]. Модель может быть, как феноменологической (на основе экспериментальных данных), так и теоретической (на основе методов теоретической физики) [32].

Теоретическая часть.

Моделирование включает последовательное решение трех связанных задач: электромагнитной, тепловой и механической.

Задача 1. Электромагнитная задача, целью которой является расчет распределения плотности тока и электромагнитных сил в проволоке при пропускании импульсов тока. Основными уравнения для этой задачи будут являться:

1) уравнение электростатики (закон Ома в дифференциальной форме):

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = 0,$$

где φ – электрический потенциал, В; σ – электропроводность материала, См/м; ∇ – оператор набла (градиента);

2) плотность тока (закон Ома):

$$J = -\sigma \nabla \varphi,$$

где J – вектор плотности тока, А/м²;

3) уравнение непрерывности (сохранения заряда):

$$\nabla \cdot J = 0,$$

4) источник Джоулева нагрева:

$$Q_J = J \cdot E = \sigma \cdot |\nabla \varphi|^2,$$

где Q_J – мощность Джоулева нагрева на единицу объема, Вт/м³; E – напряженность электрического поля, В/м.

Граничные условия будут иметь вид: на аноде ($z = 0$): $\varphi = U(t)$; на катоде ($z = L$): $\varphi = 0$; на боковой поверхности: $n \cdot J = 0$ (отсутствие тока через боковую поверхность), где n – нормаль к поверхности.

Зависимости свойств от температуры будут описываться уравнением:

$$\sigma(T) = \frac{1}{\rho_0 \cdot [1 + \alpha(T - T_0)]},$$

где ρ_0 – удельное сопротивление при T_0 , Ом·м; α – температурный коэффициент сопротивления, 1/К; T_0 – начальная температура, К.

Задача 2. Тепловая задача, целью которой является определение температурного поля в проволокe с учетом Джоулева нагрева и теплоотдачи в окружающую среду.

Здесь одно основное уравнение – это уравнение теплопроводности с источником тепла, которое будет иметь вид:

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_J,$$

где ρ – плотность материала, кг/м³; C_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); T – температура, К; t – время, с; k – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); Q_J – источник тепла от Джоулева нагрева, Вт/м³.

Граничные условия будут иметь вид: на торцах проволоки – тепловой контакт с электродами либо адиабатические условия; на боковой поверхности – конвективный теплообмен:

$$-k \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = h \cdot (T - T_{amb}),$$

где h – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·К); T_{amb} – температура окружающей среды, К.

Начальное условие будет задаваться как $T(x, y, z, 0) = T_0$. Температурные зависимости свойств будут следующими: теплопроводность – $k(T)$; теплоемкость – $C_p(T)$; плотность – $\rho(T)$.

Задача 3. Механическая задача, целью которой является анализ напряженно-деформированного состояния проволоки под действием механического напряжения от груза и температурных напряжений.

Основными уравнения для этой задачи будут являться:

1) уравнение равновесия:

$$\nabla \cdot \sigma + f = \rho \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2},$$

где σ – тензор напряжений, Па; f – объемные силы, Н/м³; u – вектор перемещений, м.

2) закон Гука для линейно-упругого материала:

$$\sigma = C : (\varepsilon - \varepsilon_{th} - \varepsilon_{pl}),$$

где C – тензор упругих модулей, Па; ε – тензор полной деформации; ε_{th} – тензор температурных деформаций; ε_{pl} – тензор пластических деформаций.

3) температурные деформации:

$$\varepsilon_{th} = \alpha_T \cdot (T - T_0) \cdot I,$$

где α_T – коэффициент теплового расширения, 1/К; I – единичный тензор.

4) критерий пластичности Мизеса:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} s : s} \leq \sigma_y,$$

где σ_{eq} – эквивалентное напряжение по Мизесу, Па; s – девиатор напряжений; σ_y – предел текучести материала, Па.

5) эволюция пластических деформаций (ассоциированный закон течения):

$$d\varepsilon_{pl} = d\lambda \cdot \frac{\partial f}{\partial \sigma},$$

где $d\lambda$ – пластический множитель; f – функция текучести.

Граничные условия будут иметь вид: на верхнем торце ($z = 0$) – жесткая заделка $u = 0$; на нижнем торце ($z = L$) – растягивающая сила от груза $\sigma \cdot n = (F_{load}/A) \cdot n$, где F_{load} – сила от груза, Н; A – площадь сечения, м²; на боковой поверхности – свободные условия $\sigma \cdot n = 0$.

Начальные условия будут задаваться как: начальное напряженное состояние $\sigma(t = 0) = 0$; начальные деформации $\varepsilon(t = 0) = 0$.

Вышерассмотренные задачи связаны между собой следующим образом:

1. Электромагнитная $\rightarrow$ тепловая: источник тепла Q_j зависит от плотности тока J , рассчитанной в электромагнитной задаче.

2. Тепловая $\rightarrow$ механическая: температурное поле $T(x, y, z, t)$ влияет на механические свойства ($E(T)$, $\sigma_y(T)$); температурные деформации $\varepsilon_{th}(T)$; электропроводность $\sigma(T)$ (обратная связь с электромагнитной задачей).

3. Механическая $\rightarrow$ электромагнитная: деформация может влиять на электропроводность (пьезорезистивный эффект), но для отдельных материалов этим эффектом часто пренебрегают.

С учетом описанной связи и включая обратную задачу, получим итоговую систему уравнений для нашего анализа:

$$\left\{ \begin{array}{l} J = \sigma(T, \varepsilon)E, \nabla \cdot J + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0; \\ \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k(T) \nabla T) + J \cdot E; \\ \nabla \cdot \sigma + f = 0, \sigma = C(T) : (\varepsilon - \alpha(T)(T - T_0)I), \\ \text{при } \sigma_{\text{экв}} \leq \sigma_y(T); \\ Q_j = J \cdot E, \sigma(T, \varepsilon) = \sigma_0(T) + \Pi \varepsilon_{ii}. \end{array} \right.$$

Для решения этой нелинейной и связанной системы уравнений разработаем код в пакете программ MatLab. В зависимости от материала и условий задачи некоторые связи могут быть опущены, например, для наших условий опустим пьезорезистивную связь.

Практическая часть.

Рассмотрим пошаговую реализацию нашей модели в пакете программ MatLab.

Шаг 1. Подготовка геометрии и сетки. Для создания расчетной сетки будем использовать Partial Differential Equation (PDE) Toolbox, как показано во фрагменте кода для электромагнитной задачи:

```
em_model = createpde('electromagnetic', 'electrostatic');
```

```
gm = multicylinder(r, L);
em_model.Geometry = gm;
generateMesh(em_model, 'Hmax', r/2);
```

Шаг 2. Задание физических свойств материала. Определяем зависимости свойств от температуры, как показано в следующем фрагменте кода на примере меди при 293 К:

```
rho_0 = 1.68e-8; % удельное
сопротивление, Ом·м
sigma_0 = 1/rho_0; % электропроводность,
См/м
Cp = 385; % теплоемкость, Дж/(кг·К)
k = 400; % теплопроводность, Вт/(м·К)
rho_mat = 8960; % плотность, кг/м³
E = 110e9; % модуль Юнга, Па
nu = 0.34; % коэффициент Пуассона
alpha_T = 16.5e-6; % коэффициент
теплового расширения, 1/К
```

Шаг 3. Моделирование электромагнитной задачи. Решаем уравнение Максвелла для скалярного потенциала ϕ , как показано во фрагменте кода ниже:

```
em_model.VacuumPermittivity =
8.8541878128e-12;
electromagneticBC(em_model, 'Face', 1,
'Voltage', 0);
electromagneticBC(em_model, 'Face', 2,
'Voltage', U_pulse);
electromagneticProperties(em_model, ...
'RelativePermittivity', 1, ...
'Conductivity', sigma_0);
```

Шаг 4. Расчет теплового поля. Реализуем уравнение теплопроводности с источником тепла (Джоулев нагрев), как показано во фрагменте кода ниже:

```
thermalmodel = createpde('thermal',
'transient');
thermalmodel.Geometry = em_model.
Geometry;
thermalmodel.Mesh = em_model.Mesh;
thermalProperties(thermalmodel,
'ThermalConductivity', k, 'MassDensity', rho_
mat, 'SpecificHeat', Cp);
thermalIC(thermalmodel, 293);
```

```

all_faces = 1:em_model.Geometry.
NumFaces;
thermalBC(thermalmodel, 'Face',
all_faces, 'ConvectionCoefficient', 10,
'AmbientTemperature', 293);

```

Шаг 5. Анализ механического поведения. Реализуем уравнения механики деформируемого твердого тела, как показано во фрагменте кода ниже:

```

structuralmodel = createpde('structural',
'static-solid');
structuralmodel.Geometry = em_model.
Geometry;
structuralmodel.Mesh = em_model.Mesh;
structuralProperties(structuralmodel,
'YoungsModulus', E, 'PoissonsRatio', nu);
structuralBC(structuralmodel, 'Face', 1,
'Constraint', 'fixed');
structuralBoundaryLoad(structuralmodel,
'Face', 2, 'Pressure', sigma_mech);

```

Шаг 6. Связывание задач и итерационный процесс. Реализуем цикл, где результаты одной задачи передаются как входные данные для другой, как показано в следующем фрагменте кода:

```

T_current = 293 * ones(size(em_model.
Mesh.Nodes, 2), 1); % начальная температура
T_avg = mean(T_current);
for i = 1:n_steps
    t = tlist(i);
    % Тепловая задача
    Q_joule = J_current^2 * rho_0;
    if i == 1
        thermalIC(thermalmodel, 293); %
        начальная температура 293 K
    else
        thermalIC(thermalmodel, thermalresults.
Temperature(:, end));
    end
    % Обновление свойств материалов с
    учетом средней температуры
    rho_T = rho_0 * (1 + 0.004 * (T_avg - 293));
    E_T = E * (1 - 0.001 * (T_avg - 293));
    % Механическая задача
    structuralProperties(structuralmodel,
'YoungsModulus', E_T, 'PoissonsRatio', nu);

```

Шаг 7. Визуализация и анализ результатов. В заключении строим графики и анимации, как показано во фрагменте кода ниже:

```

% Визуализация результатов
figure('Position', [100, 100, 1200, 800]);
% График 1: Температура в центре
проволоки
subplot(2,2,1);
plot(tlist_save*1000, T_results(1, :),
'LineWidth', 2);
% График 2: Напряжение по Мизесу
subplot(2,2,2);
plot(tlist_save*1000, stress_results(1,
:)/1e6, 'LineWidth', 2);
% График 3: Деформация
subplot(2,2,3);
plot(tlist_save*1000, strain_results(1, :),
'LineWidth', 2);
% График 4: Плотность тока
subplot(2,2,4);
J_plot = arrayfun(@(t) (mod(t, T_period)
<= tau) * J_pulse, tlist_save);
plot(tlist_save*1000, J_plot/1e6,
'LineWidth', 2);

```

Отметим следующие ключевые нюансы, учитываемые при разработке как нашей модели в пакете программ MatLab, так и при моделировании в целом:

- временной шаг должен быть достаточно малым для корректного описания переходных процессов, например, для электромагнитной задачи лучше выбрать $10^{-7} \div 10^{-8}$ с, а для тепловой задачи – $10^{-6} \div 10^{-5}$ с;

- необходима проверка сходимости решения по сетке и временному шагу, для чего можно использовать адаптивное измельчение сетки в зонах высоких градиентов;

- в связи с наличием нелинейных процессов необходимо учитывать температурную зависимость свойств, пластическую деформацию (используя нелинейные модели пластичности) и влияние деформации на электропроводность;

- для ускорения расчетов можно прибегнуть к оптимизации вычислений, например, используя параллельные вычисления (parfor), применяя методы редукции модели

(Model Order Reduction) или сохраняя промежуточные результаты для повторного использования.

2. Результаты исследования

Перейдем к результатам исследования при реализации рассмотренной модели для анализа переходных процессов в медной и алюминиевой проволоках диаметром 1 мм и длиной примерно 50 см, которая подвешена

между электродами на мертвом грузе, при пропускании импульсов тока, как показано на схеме (рис. 1) [33, 34].

Для моделирования будем использовать следующие параметры импульса: плотность тока $J = 1 \cdot 10^{10}$ А/м² (оптимальная для ЭПЭ); длительность импульса $\tau = 10^{-5}$ с; частота следования $f = 1000$ Гц; амплитуда напряжения $U = 10$ В. Параметры для меди и алюминия (при $T = 293$ К) представлены в табл. 1.

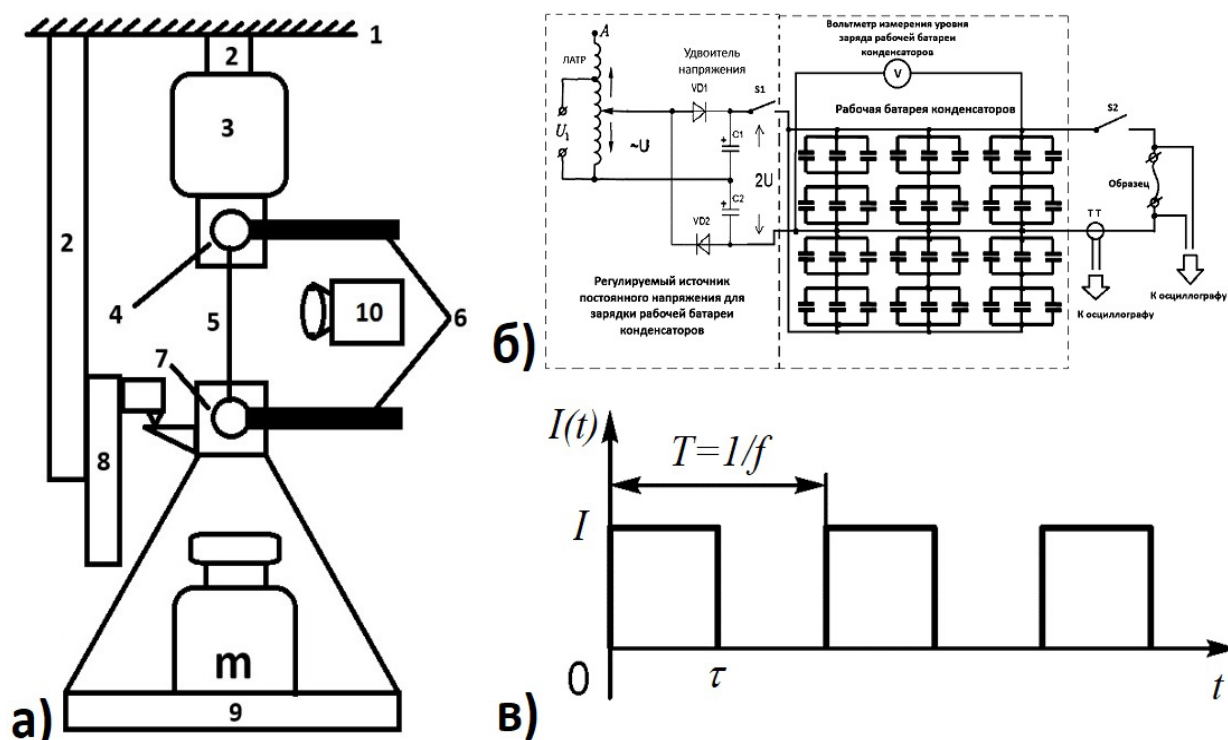


Рис. 1. Схема механической части установки для стимулирования электропластической деформации:

1 – неподвижная опора; 2 – неподвижные подвесы; 3 – тензодатчик для контроля усилия растяжения; 4 – электроизолирующий подвес тензодатчика; 5 – образец исследования в виде металлической проволоки или полосы; 6 – кабели подвода импульсного тока; 7 – электроизолирующий подвес; 8 – оптическая линейка; 9 – подвижная платформа, нагружаемая переменной массой m (а) (взято из [33]); электрическая часть установки с блоком конденсаторов (б) (взято из [34]); форма и параметры импульсного тока (в)

Fig. 1. Diagram of the mechanical part of the installation to stimulate electroplastic deformation:

1 – fixed support; 2 – fixed suspensions; 3 – load cell to control the tensile force; 4 – insulating suspension of the load cell; 5 – test sample in the form of metal wire or strip; 6 – pulse current supply cables; 7 – insulating suspension; 8 – optical ruler; 9 – a movable platform loaded with a variable mass m (a) (taken from [33]); the electrical part of the installation with a block of capacitors (b) (taken from [34]); the shape and parameters of the pulse current (v)

Таблица 1. Параметры меди и алюминия для моделирования

Table 1. Parameters of copper and aluminum for modeling

Параметр / Parameter	Обозначение / Designation	Значение для меди / Value for Copper	Значение для алюминия / Value for Aluminum
Плотность, кг/м ³ / Density, kg/m ³	ρ	8690	2700
Удельное сопротивление, Ом·м / Resistivity, Ohms·m	ρ_0	$1,68 \cdot 10^{-8}$	$2,65 \cdot 10^{-8}$
Температурный коэффициент сопротивления, 1/K / Temperature coefficient of resistance, 1/K	α	$3,93 \cdot 10^{-3}$	$4,03 \cdot 10^{-3}$
Теплопроводность, Вт/(м·К) / Thermal conductivity, W/(m·K)	k	400	237
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К) / Specific heat, J/(kg·K)	C_p	385	900
Модуль Юнга, Па / Young's module, Pa	E	$110 \cdot 10^9$	$70 \cdot 10^9$
Коэффициент Пуассона / The Poisson's ratio	ν	0,34	0,33
Коэффициент теплового расширения, 1/K / Coefficient of thermal expansion, 1/K	α_T	$16,5 \cdot 10^{-6}$	$23,1 \cdot 10^{-6}$
Предел текучести, Па / Yield strength, Pa	σ_y	$70 \cdot 10^6$	$45 \cdot 10^6$
Температура плавления, К / Melting point, K	$T_{пл}$	1356,55	933,5
Температура Дебая, К / Debye temperature, K	Θ_D	315	394

Используя геометрические параметры образцов в виде медной и алюминиевой проволок, их физические свойства и параметры импульса, составим окончатель-

ный код компьютерной модели в MatLab, фрагмент основной расчетной части которого представлен на рис. 2.

```

49 % Lumped parameters for both materials
50 n_total_Cu = rho_max_Cu * V_total;
51 C_total_Cu = Cp_Cu * n_total_Cu;
52
53 n_total_Al = rho_max_Al * V_total;
54 C_total_Al = Cp_Al * n_total_Al;
55
56 % Pre-calculate the current pulse (same for both)
57 J_pulse_array = arrayfun(@(t) mod(t, T_period) <= tau) * J_pulse, tlist);
58
59 % Initialize result arrays
60 T_avg_Cu = 293 * ones(1, n_steps);
61 T_avg_Al = 293 * ones(1, n_steps);
62
63 sigma_total_Cu = zeros(1, n_steps);
64 sigma_total_Al = zeros(1, n_steps);
65
66 strain_total_Cu = zeros(1, n_steps);
67 strain_total_Al = zeros(1, n_steps);
68
69 plastic_strain_Cu = zeros(1, n_steps);
70 plastic_strain_Al = zeros(1, n_steps);
71
72 save_interval = 10;
73 n_save_steps = ceil(n_steps / save_interval);
74 save_times = 1:save_interval:n_steps;
75 if save_times(end) > n_steps
76     save_times = save_times(n_steps);
77     n_save_steps = n_save_steps - 1;
78 end
79
80 tlist_save = tlist(save_times);
81
82 T_avg_Cu = zeros(1, n_save_steps); T_avg_Al = zeros(1, n_save_steps);
83 sigma_total_Cu = zeros(1, n_save_steps); sigma_total_Al = zeros(1, n_save_steps);
84 strain_total_Cu = zeros(1, n_save_steps); strain_total_Al = zeros(1, n_save_steps);
85 plastic_strain_Cu = zeros(1, n_save_steps); plastic_strain_Al = zeros(1, n_save_steps);
86
87 save_id = 0;
88
89 % Main calculation loop
90 for i = 1:n_steps
91     t = tlist(i);
92     % --- Copper ---
93     if i > 1
94         % Temperature-dependent resistivity (поискать аппроксимацию)
95         rho_T_Cu = rho_0_Cu * (1 + 3.93e-3 * (T_avg_Cu(i-1) - 293));
96         Q Joule_power_Cu = J_pulse_array(i)^2 * rho_T_Cu * V_total;
97
98         % Прочность pure annealed copper (поискать)
99         h = 25; % коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·K)
100         T_emb = 293;
101         Q_loss_Cu = h * S_surface * (T_avg_Cu(i-1) - T_emb);
102
103         dt_step = tlist(i) - tlist(i-1);
104         dT_Cu = (Q Joule_power_Cu - Q_loss_Cu) * dt_step / C_total_Cu;
105         T_avg_Cu(i) = T_avg_Cu(i-1) + dT_Cu;
106         T_avg_Cu(i) = max(T_avg_Cu(i), 293);
107         T_avg_Cu(i) = min(T_avg_Cu(i), 1350);
108     end
109
110 % Mechanical: thermal stress
111 sigma_thermal_Cu = E_Cu * alpha_T_Cu * (T_avg_Cu(i) - 293);
112 sigma_total_Cu(i) = sigma_mech_Cu + sigma_thermal_Cu;
113
114 % Elastic (elastic < simple plastic)
115 strain_elastic_Cu = sigma_total_Cu(i) / E_Cu;
116 if sigma_total_Cu(i) > sigma_y_Cu
117     plastic_strain_Cu(i) = plastic_strain_Cu(i-1) + 1e-8;
118 else
119     plastic_strain_Cu(i) = plastic_strain_Cu(i-1);
120 end
121 strain_total_Cu(i) = strain_elastic_Cu + plastic_strain_Cu(i);
122
123 % --- Aluminum ---
124 if i > 1
125     rho_T_Al = rho_0_Al * (1 + 4.03e-3 * (T_avg_Al(i-1) - 293)); % коэффициент
126     Q Joule_power_Al = J_pulse_array(i)^2 * rho_T_Al * V_total;
127
128     % Прочность pure annealed aluminum (поискать)
129     h = 25; % коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·K)
130     T_emb = 293;
131     Q_loss_Al = h * S_surface * (T_avg_Al(i-1) - T_emb);
132
133     dt_step = tlist(i) - tlist(i-1);
134     dT_Al = (Q Joule_power_Al - Q_loss_Al) * dt_step / C_total_Al;
135     T_avg_Al(i) = T_avg_Al(i-1) + dT_Al;
136     T_avg_Al(i) = max(T_avg_Al(i), 293);
137     T_avg_Al(i) = min(T_avg_Al(i), 933);
138 end
139
140 sigma_thermal_Al = E_Al * alpha_T_Al * (T_avg_Al(i) - 293);
141 sigma_total_Al(i) = sigma_mech_Al + sigma_thermal_Al;
142
143 strain_elastic_Al = sigma_total_Al(i) / E_Al;
144 if sigma_total_Al(i) > sigma_y_Al
145     plastic_strain_Al(i) = plastic_strain_Al(i-1) + 1e-8;
146 else
147     plastic_strain_Al(i) = plastic_strain_Al(i-1);
148 end
149 strain_total_Al(i) = strain_elastic_Al + plastic_strain_Al(i);
150
151 % Save results
152 if any(save_times == i)
153     save_id = save_id + 1;
154     T_avg_Cu(save_id) = T_avg_Cu(i); T_avg_Al(save_id) = T_avg_Al(i);
155     sigma_total_Cu(save_id) = sigma_total_Cu(i); sigma_total_Al(save_id) = sigma_total_Al(i);
156     strain_total_Cu(save_id) = strain_total_Cu(i); strain_total_Al(save_id) = strain_total_Al(i);
157     plastic_strain_Cu(save_id) = plastic_strain_Cu(i); plastic_strain_Al(save_id) = plastic_strain_Al(i);
158 end
159
160 % Visualization of results (comparison Cu vs Al)
161 figure('Position', [100, 100, 1200, 800], 'Color', 'w');
162
163 % Plot 1: Average temperature
164 subplot(2,2,1);
165 h_T_Cu = plot(tlist_save, save_T_avg_Cu, 'b-', 'LineWidth', 2);
166 hold on;
167 h_T_Al = plot(tlist_save, save_T_avg_Al, 'r-', 'LineWidth', 2);
168 xlabel('Time, ms', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'bold');
169 ylabel('Average temperature, K', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold');
170 title('Average temperature of the wire Cu vs Al', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold');

```

Рис. 2. Фрагмент кода математической модели исследования переходных процессов при воздействии импульсным током на металлы и сплавы для стимулирования электропластической деформации

Fig. 2. A code fragment of a mathematical model for studying transient processes in metals and alloys exposed to pulsed current for stimulation of electroplastic deformation

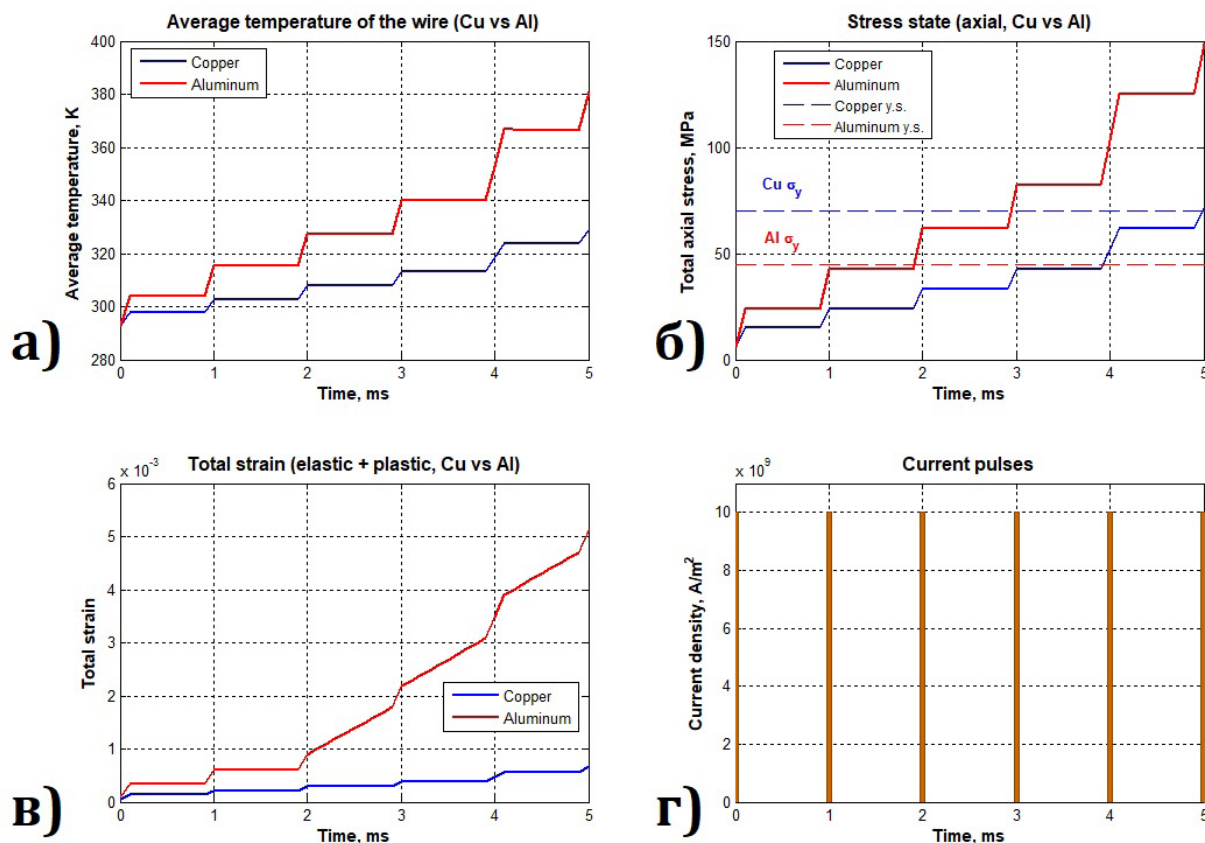


Рис. 3. Результаты моделирования:
а – средняя температура проволок; *б* – напряжения по Мизесу;
в – деформация; *г* – плотность тока

Fig. 3. Simulation results:
a – average temperature of wires; *б* – Mises tension;
в – deformation; *г* – current density

В качестве результатов моделирования представлены графики средних температур проволок (рис. 3, *а*), напряжений по Мизесу (рис. 3, *б*), деформаций проволок (рис. 3, *в*) и плотности тока (рис. 3, *г*) для медного и алюминиевого образцов.

Температурный профиль показывает нагрев проволок за счет Джоулева тепла. При заданных параметрах температура не превышает 400 К, что исключает перегрев. Напряжения по Мизесу демонстрирует, как импульсы тока приближают эффективное напряжение течения материала к его пределу текучести, тем самым открывая путь к пластической деформации. Деформация показывает скачкообразное удлинение проволоки в моменты прохождения импульсов. Видно,

что на примере алюминиевого образца после достижения предела текучести (после третьего импульса) деформация происходит интенсивнее. Плотность тока визуализирует форму импульсов и их периодичность.

3. Обсуждение результатов

Обсудим результаты моделирования:

1. Оптимальность параметров. Выбранные параметры ($J = 1 \cdot 10^{10}$ А/м², $\tau = 10^{-5}$ с, $f = 1000$ Гц) обеспечивают достаточную плотность тока для активации ЭПЭ, при этом электроны проводимости эффективно взаимодействуют с дислокациями, повышая их подвижность. Видно, что кратковременность импульсов, минимизирующая Джоулев нагрев, исключает перегрев и структурные

изменения материала. Каждый импульс вызывает микроскачок деформации, который суммируется во времени и является достаточным для накопления ЭПД. Моделирование формы импульса в MatLab и SimInTech было реализовано и сопоставлено с реальными измерениями в [35, 36]. Также в [37, 38] был разработан метод измерения импульсных токов большой величины специально для изучения ЭПЭ.

2. Анализ графика температуры показывает быстрый локальный нагрев в моменты импульса $\Delta T_{\text{Cu}} \leq 6 \text{ K}$ (в сумме не выше 50 K) и $\Delta T_{\text{Al}} \leq 15 \text{ K}$ (в сумме не выше 100 K), а также стабилизацию температуры в паузах между ними за счет сопоставимости Джоулева нагрева и теплоотвода. Дополнительно проанализируем распределение температуры в сечениях проволоки (2D-срез), показанное на рис. 4, в двух интервалах времени до (3,8 мс) и после (4,2 мс) очередного импульса тока.

На рис. 4 видно, что из-за небольшой длительности импульса и достаточно высокой его плотности образец нагревается практически равномерно по всей своей длине, при этом температура в центре проволоки

выше чем на поверхности. Это связано с небольшой толщиной образца (1 мм) и практически отсутствующим скин-эффектом. В момент очередного импульса ($t = 3,8 \div 4,2 \text{ мс}$) мы наблюдаем увеличение температуры, согласующееся с графиком на рис. 3, а.

3. Напряженно-деформированное состояние. График напряжений по Мизесу демонстрирует приближение эффективного напряжения течения материала к его пределу текучести во время импульсов тока. Это позволяет открыть путь к пластической деформации. Напряжение по Мизесу увеличивается на 30÷50% для меди и 70÷90% для алюминия каждый раз в моменты прохождения импульсов. Анализ графика деформации показывает микроскачки удлинения проволоки в моменты прохождения каждого импульса, а также суммарное накопление пластической деформации за серию импульсов. Причем, видно, что у алюминиевого образца после достижения предела текучести деформация происходит интенсивнее. Суммарное удлинение медного образца после пяти импульсов составило 0,52 мкм, тогда как для алюминиевого образца превысило 4,5 мкм.

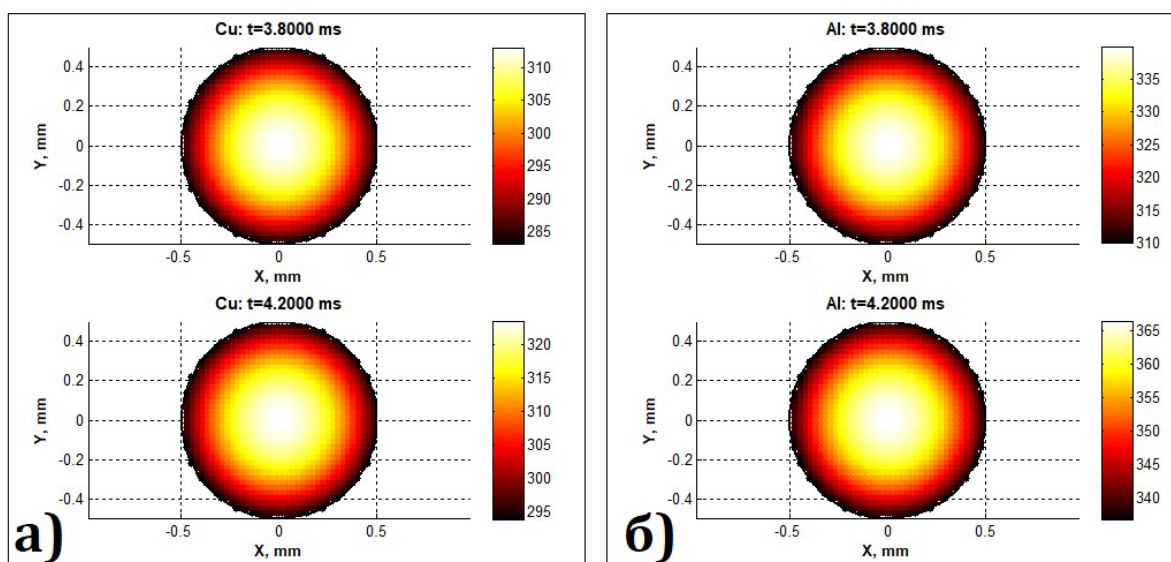


Рис. 4. Распределение температуры в сечениях проволоки:
а – для меди, б – для алюминия

Fig. 4. Temperature distribution in wire sections:
a – for copper, б – for aluminum

4. Оценивая связь параметров импульса и ЭПЭ, можно отметить, что при $J < 3 \cdot 10^9$ А/м² ЭПЭ практически отсутствует, а при $J > 8 \cdot 10^{10}$ А/м² резко возрастает нагрев, что может привести к локальному оплавлению. Проанализировав влияние длительности импульса на ЭПЭ, установили, что при $\tau < 10^{-6}$ с эффект мал из-за недостаточного времени взаимодействия электронов с дислокациями, а при $\tau > 10^{-4}$ с доминирует тепловой эффект. Аналогично было проанализировано влияние частоты на ЭПЭ. При $f < 500$ Гц накопление деформации идет медленно, а при $f > 2000$ Гц система не успевает остывать, что приводит к тепловому насыщению.

По итогам моделирования провели сравнение с результатами экспериментов. Результаты моделирования согласуются с экспериментальными данными, полученными авторами в работах [39–41]: наблюдаемые скачки деформации соответствуют измерениям на аналогичных образцах; температурные профили совпадают с термографическими снимками; зависимость эффекта от плотности тока имеет пороговый характер, что подтверждается лабораторными испытаниями в [42]. Несмотря на наличие определенных ограничений модели, связанных с учетом неоднородности материала, эволюции дислокационной структуры, электромиграционными эффектами, она показывает весьма высокую точность, достаточную для быстрого анализа переходных процессов при воздействии ИТ на металлы и сплавы для стимулирования ЭПД.

Также отметим, что помимо стимулирования ЭПД, в настоящее время ЭПЭ находит активное применение для залечивания макротрещин в металлах [43, 44] и ослабления пружинения титановых сплавов [45, 46]. Подробный обзор современных технологий в области ЭИО металлов и сплавов на основе ЭПЭ выполнен авторами в работах [47, 48].

Выводы

В результате проделанной работы были исследованы переходные процессы, протекающие в материале (образце) при воздействии

импульсным током, для стимулирования электропластической деформации. Были выбраны материалы: медь и алюминий. Представлена теоретическая (численная) модель, включающая в себя три связанные между собой задачи: электромагнитную, тепловую и механическую, которые были реализованы в виде кода в пакете программ MatLab. Полученные результаты моделирования были оценены и обсуждены по таким признакам, как оптимальность параметров, анализ температуры и деформации, эффект снижения напряжения, связь параметров импульса и ЭПЭ.

По результатам такой оценки можно представить следующие практические рекомендации для стимулирования ЭПД:

- для данной геометрии образца (1 мм × 500 мм) оптимальны параметры $J = 5 \cdot 10^9 \div 5 \cdot 10^{10}$ А/м², $\tau = (1 \div 5) \cdot 10^{-5}$ с, $f = (800 \div 1200)$ Гц;
- необходимо контролировать температуру и снижать плотность тока или частоту при превышении 400 К;
- для более толстых проволок требуется увеличение плотности тока пропорционально площади сечения;
- при увеличении длины образца (> 1 м) необходимо учитывать падение напряжения вдоль проволоки и корректировать амплитуду импульса.

В заключении можно отметить, что моделирование в пакете программ MatLab позволяет прогнозировать поведение материала при ЭИО и оптимизировать параметры импульсов для максимальной эффективности ЭПЭ, при этом необходимо избегать перегрева, чтобы минимизировать тепловой эффект. Для этих целей ранее авторами была разработана программа автоматической нормировки импульса тока по величине заряда батареи конденсаторов [49]. С помощью разработанной модели можно предсказывать накопление пластической деформации и анализировать распределение тепловых полей в объеме образца.

Полученные результаты могут быть использованы для проектирования новых или

модернизации существующих установок электроимпульсной обработки [50], а также для разработки технологических режимов обработки таких металлов, как медь и алюминий, а также их сплавов.

Благодарности / Acknowledgments

Исследование (для М.Н. Семёновой и Ю.В. Бебикова) выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-22-00690, <https://rscf.ru/project/25-22-00690/>.

The research (for M.N. Semenova and Yu.V. Bebikhov) was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 25-22-00690, <https://rscf.ru/project/25-22-00690/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Skvortsov O.B., Stashenko V.I., Savenko V.S. Kinetic processes in metals and alloys under electric pulse treatment used to induce the electroplastic effect // Bulletin of the Belarusian-Russian University. 4(85), 74–84 (2024). (In Russian) [Скворцов О.Б., Сташенко В.И., Савенко В.С. Кинетические процессы в металлах и сплавах при электроимпульсном воздействии, используемом для получения электропластического эффекта // Вестник Белорусско-Российского университета. 4(85), 74–84 (2024)]. DOI: 10.24412/2077-8481-2024-4-74-84.
2. Troitskii O.A. Electromechanical effect in metals // Pis'ma v ZhETF. 2(10), 18–22 (1969). (In Russian) [Троицкий О.А. Электромеханический эффект в металлах // Письма в ЖЭТФ. 2(10), 18–22 (1969)].
3. Troitskii O.A., Gusev E.V. Electroplastic effect in indium (In) // Strength of Materials. 5(12), 1476–1479 (1973). DOI: 10.1007/BF00771842.
4. Troitskii O.A., Maistrenko L.G. Electroplastic deformation in metals // Soviet Materials Science. 8(6), 686–689 (1974). DOI: 10.1007/BF00722924.
5. Stashenko V.I., Troitskii O.A. Influence of pulsed current peak on the creep rate of zinc crystals // Strength of Materials. 14(10), 1337–1341 (1982). DOI: 10.1007/BF00770130.
6. Roshchupkin A.M., Troitskii O.A., Spitsyn V.I., Stashenko V.I. Advanced concepts regarding the effect of high-density current on the plastic deformation of metals // Doklady Akademii Nauk SSSR. 286(3), 633–636 (1986). (In Russian) [Рошчупкин А.М., Троицкий О.А., Спицын В.И., Сташенко В.И. Разработанные концепции о действии тока высокой плотности на пластическую деформацию металлов // Доклады Академии наук СССР. 286(3), 633–636 (1986)].
7. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. A study of the electroplastic effect in metals // Scripta Metallurgica. 12(11), 1063–1068 (1978). DOI: 10.1016/0036-9748(78)90026-1.
8. Bryzgalov V.A., Dmitriev S.V., Korznikova E.A., Bebikhov Yu.V. Molecular dynamics simulation of the dislocation electroplastic effect in a single crystal // Frontier Materials & Technologies. 3, 61–68 (2022). (In Russian) [Брызгалов В.А., Дмитриев С.В., Корзникова Е.А., Бебихов Ю.В. Моделирование дислокационного электропластического эффекта в монокристалле методом молекулярной динамики // Frontier Materials & Technologies. 3, 61–68 (2022)]. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-3-1-61-68.
9. Abdullina D.U., Bebikhov Yu.V., Tatarinov P.S., Dmitriev S.V. Review of recent advances in the field of electroplastic metal forming // Fundamental'nye Problemy Sovremennogo Materialovedeniya. 20(4), 469–483 (2023). (In Russian) [Абдуллина Д.У., Бебихов Ю.В., Татаринцев П.С., Дмитриев С.В. Обзор последних достижений в области электропластической обработки металлов давлением // Фундаментальные проблемы современного материаловедения, 20(4), 469–483 (2023)]. DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.04.006.
10. Morkina A.Y., Tarov D.V., Yakushev I.A., et al. Effect of electroplasticity studied for aluminum wires under tension // Procedia Structural Integrity. 65, 158–162 (2024). DOI: 10.1016/j.prostr.2024.11.025.
11. Kukudzhnikov K.V., Khalikova G.R., Korznikova E.A., et al. Healing of long fatigue cracks in steel plates by high-density current pulses // Mechanics of Solids. 59(5), 3223–3234 (2024). DOI: 10.1134/S0025654424605949.
12. Morkina A.Y., Tarov D.V., Tatarinov P.S., et al. Electric pulse treatment of grade 5 titanium alloy plates after bending to reduce springback effect // Mechanics of Solids. 60(3), 2344–2352 (2025). DOI: 10.1134/S0025654425601971.
13. Kukudzhnikov K.V., Korznikova E.A., Chentsov A.V., Dmitriev S.V. A novel approach to determining the parameters of electric pulse healing of fatigue cracks // Materials Letters. 404, 139565 (2026). DOI: 10.1016/j.matlet.2025.139565.
14. Astanin V.V., Khayrullina D.R., Pavlova T.E., et al. Electroplastic effect in the process of electromagnetic forming // Materials. Technologies. Design. 6(3), 5–17 (2024). (In Russian). [Астанин В.В., Хайруллина Д.Р., Павлова Т.Е. и др. Электропластический эффект в процессе электромагнитной формовки // Materials. Technologies. Design. 6(3), 5–17 (2024)]. DOI: 10.54708/26587572_2024_63185.
15. Korolkov O.E., Misochenko A.A., Stolyarov V.V. Electroplastic effect in titanium during compression // Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials. 90(12), 65–71 (2024). (In Russian) [Корольков О.Е., Мисоченко

А.А., Столяров В.В. Электропластический эффект в титане при сжатии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 90(12), 65–71 (2024). DOI: 10.26896/1028-6861-2024-90-12-65-71.

16. Khayrullina D.R., Pavlova T.E., Kozlov E.D., et al. Electroplastic effect in electromagnetic forming technology // *Molodoi Uchenyi*. 25(524), 31–35 (2024). (In Russian). [Хайруллина Д.Р., Павлова Т.Е., Козлов Е.Д. и др. Электропластический эффект в технологии электромагнитной штамповки // Молодой ученый. 25 (524), 31–35 (2024)].

17. Pochivalov Yu.I. Structure and properties of low-alloy steel 10G2FBYu after rolling in profiled rolls under electroplasticity conditions // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Chernaya Metallurgiya*. 66(6), 659–665 (2023). (In Russian) [Почивалов Ю.И. Структура и свойства малолегированной стали 10Г2ФБЮ после прокатки в рельефных валах в условиях электропластичности // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 66(6), 659–665 (2023)]. DOI: 10.17073/0368-0797-2023-6-659-665.

18. Vovchenko A.I., Demidenko L.Yu., Polovinka V.D. Influence of current pulse parameters on the development of physical contact during pressure welding of metals // *Electronic Processing of Materials*. 49(4), 30–34 (2013). (In Russian) [Вовченко А.И., Демиденко Л.Ю., Половинка В.Д. Влияние параметров импульсов тока на развитие физического контакта при сварке металлов давлением // Электронная обработка материалов. 49(4), 30–34 (2013)].

19. Savenko V.S., Yangsi Ch. Improving the operating characteristics of aluminium by electroplastic deformation // *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical Series*. 69(4), 286–296 (2024). (In Russian) [Савенко В.С., Чэнь Я. Повышение эксплуатационных характеристик алюминия путем электропластической деформации // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. 69(4), 286–296 (2024)]. DOI: 10.29235/1561-8358-2024-69-4-286-296.

20. Semenova M.N., Bebikhov Y.V., Semenov A.S. Increasing the corrosion resistance of metal alloys by affecting dislocations during electrical pulse treatment // *Proceedings of SPIE*. 14165, 1416502 (2026). DOI: 10.1117/12.3108510.

21. Minko D.V. Analysis of the prospects of the application of the electroplastic effect in the processes of processing metals with pressure // *Foundry Production and Metallurgy*. 4, 125–130 (2020). (In Russian) [Минько Д.В. Анализ перспектив применения электропластического эффекта в процессах обработки металлов давлением // Литье и металлургия. 4, 125–130 (2020)]. DOI: 10.21122/1683-6065-2020-4-125-130.

22. Troitskii O.A. Electron-plastic effect in metals // *Problemy Prochnosti*. 2, 176 (1984).

23. Zhang Q., Chen C., Yang H., Zhang J. Optimization of micropillars electroplating bonding processes and additives // *Journal of Electronic Packaging*. 147(2), 021008 (2025). DOI: 10.1115/1.4067651.

24. Stashenko V.I., Skvortsov O.B. Studying the fast-flowing mechanical and electrical processes in metals taking into account the electroplastic effect // *Tsvetnye Metally*. 1, 10 (2026). DOI: 10.17580/tsm.2026.01.10.

25. Savenko V.V. Electroplastic deformation by twinningmetals // *Acta Mechanica et Automatica*. 12(4), 259–264 (2018). DOI: 10.2478/ama-2018-0039.

26. Hu M., Jin G., Li Z., et al. Study on deformation behavior and constitutive models of tungsten alloys under electroplastic effects // *Advanced Engineering Materials*. 28(8), e202502704 (2026). DOI: 10.1002/adem.202502704.

27. Khan M.A., Riaz U., Jahangir A., et al. Temperature-dependent nonlocal micropolar fractional thermoelasticity for Rayleigh waves in skin tissue // *Applications in Engineering Science*. 26, 100331 (2026). DOI: 10.1016/j.apples.2026.100331.

28. Stolyarov V., Misochenko A. A pulsed current application to the deformation processing of materials // *Materials*. 16(18), 6270 (2023). DOI: 10.3390/ma16186270.

29. Yixin D., Dongyao J., Mengfan Y. Research on corrosion detection method of pipeline under thermal insulation with heat trace wire // *Proceedings of SPIE*. 13159, 131594M (2024). DOI: 10.1117/12.3024251.

30. Kuznetsov V.A., Kuznetsova E.S., Gromov V.E., Kosinov D.A. Automatic control of electrostimulated drawing // *Steel in Translation*. 48(8), 495–500 (2018). DOI: 10.3103/S0967091218080065.

31. Lurie S., Belov P. On model of coupled thermomechanics and electrodynamics // *Advanced Structured Materials*. 223, 421–448 (2025). DOI: 10.1007/978-3-031-90022-8_27.

32. Niu H.T., Gao P.F., Li H.W., et al. Electroplasticity of metallic materials: Electroplastic effect, mechanism, and models // *Materials Today*. 97, 103355 (2026). DOI: 10.1016/j.mattod.2026.103355.

33. Tatarinov P.S., Tatarinov V.P., Morkina A.Yu. et al. Development of a hardware and software complex for automation of measurements in the study of the electroplasticity effect // *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 92(7), 68–76 (2026). (In Russian) [Татаринов П.С., Татаринов В.П., Моркина А.Ю. и др. Разработка аппаратно-программного комплекса для автоматизации измерений в исследовании электропластического эффекта // Заводская лаборатория. Диагностика материалов.

92(7), 68–76 (2026)]. DOI: 10.26896/1028-6861-2026-92-7-68-76.

34. Tatarinov P.S., Tatarinov V.P., Sugonyako I.S., et al. Automated laboratory setup for the development of methods for electrical discharge machining of metals // *Izvestiya of Altai State University*. 1(147), 56–62 (2026). (In Russian) [Татаринов П.С., Татаринов В.П., Сугоняко И.С. и др. Автоматизированная лабораторная установка для разработки методов электроимпульсной обработки металлов // *Известия Алтайского государственного университета*. 1, 56–62 (2026)]. DOI: 10.14258/izvasu(2026)1-07.

35. Semenov A.S., Semenova M.N., Bebikhov Yu.V., Yakushev I.A. Mathematical and simulation modeling in the study of the electroplastic effect in metals // *Computational Mathematics and Modeling*. 37, 51–59 (2026). DOI: 10.1007/s10598-025-09650-y.

36. Semenov A.S., Tatarinov V.P., Tatarinov P.S., Yakushev I.A. Computer simulation of the discharge process of a capacitor bank through a sample in the form of a copper wire // *Vestnik of North-Eastern Federal University*. 22(4), 56–66 (2025). (In Russian) [Семёнов А.С., Татаринов В.П., Татаринов П.С., Якушев И.А. Компьютерное моделирование процесса разряда конденсаторной батареи через образец в виде медной проволоки // *Вестник Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова*. 22(4), 56–66 (2025)]. DOI: 10.25587/2222-5404-2025-22-4-56-66.

37. Tatarinov V.P., Tatarinov P.S., Semenov A.S., et al. Development of the method for measuring large magnitude pulse currents for studying the electroplastic effect and its modeling. In: 7th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). IEEE, 2025 P. 967–971. DOI: 10.1109/SUMMA68668.2025.11302308.

38. Tatarinov V.P., Tatarinov P.S., Bebikhov Yu.V., et al. Development of a method for measuring pulse currents of large magnitude // *Vestnik of North-Eastern Federal University*. 21(1), 81–88 (2024). (In Russian) [Татаринов В.П., Татаринов П.С., Бебихов Ю.В. и др. Разработка способа измерения импульсных токов большой величины // *Вестник Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова*. 21(1), 81–88 (2024)]. DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-1-81-88.

39. Morkina A.Y., Tarov D.V., Korznikova E.A., et al. Effect of current pulse parameters on the electroplasticity of tensioned copper wires // *European Journal of Mechanics A/Solids*. 118, 106078 (2026). DOI: 10.1016/j.euromechsol.2026.106078.

40. Morkina A.Y., Tarov D.V., Khalikova G.R., et al. Comparison of the effect of electroplasticity in copper and aluminum // *Facta Universitatis. Series: Mechanical*

Engineering. 22(4), 615–632 (2024). DOI: 10.22190/FUME240920049M.

41. Dmitriev S.V., Morkina A.Y., Tarov D.V., et al. Effect of repetitive high-density current pulses on plastic deformation of copper wires under stepwise loading // *Spectrum of Mechanical Engineering and Operational Research*. 1(1), 27–43 (2024). DOI: 10.31181/smeor1120243.

42. Morkina A.Yu., Tarov D.V., Naumova D.M., et al. Effect of repetitive high-density current pulses on plastic deformation of copper wires // *Izvestia Ufimskogo Nauchnogo Tsentra RAN*. (3), 15–23 (2024). (In Russian) [Моркина А.Ю., Таров Д.В., Наумова Д.М. и др. Влияние повторяющихся импульсов тока высокой плотности на пластическую деформацию медных проводов // *Известия Уфимского научного центра РАН*. (3), 15–23 (2024)]. DOI: 10.31040/2222-8349-2024-0-3-15-23.

43. Sugonyako I.S., Tarov D.V., Korznikova E.A., Khalikova G.R., Semenov A.S., Kukudzhinov K.V., Dmitriev S.V. Microstructure of 09G2S steel near a fatigue crack healed by pulsed current // *Preprints.org* (Posted: 10 November 2025). DOI: 10.20944/preprints202511.0698.v1.

44. Bryzgalov V.A., Morkina A.Yu., Abdullina D.U., et al. High-density pulsed current: A review of its role in healing macrocracks in metals // *Materials. Technologies. Design*. 6(2), 38–58 (2024). (In Russian) [Брызгалов В.А., Моркина А.Ю., Абдуллина Д.У. и др. Обзор исследований по заживлению макротрещин в металлах под действием импульсного тока высокой плотности // *Materials. Technologies. Design*. 6(2), 38–58 (2024)]. DOI: 10.54708/26587572_2024_621738.

45. Dmitriev S.V., Bebikhov Yu.V., Tatarinov P.S., et al. Dynamics of the sample-weight system in an experimental setup for studying the electroplasticity effect // *Mechanics of Solids*. 61, 141–150 (2026). DOI: 10.1134/S0025654426601631.

46. Morkina A.Yu., Tarov D.V., Lutfullin R.Ya., et al. Pulse current treatment of grade 5 titanium plates after bending to reduce springback effect // *Basic Problems of Material Science*. 22(3), 324–334 (2025). (In Russian) [Моркина А.Ю., Таров Д.В., Лутфуллин Р.Я. и др. Обработка импульсным током пластин титанового сплава ВТ6 после гибки для ослабления пружинения // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 22(3), 324–334 (2025)]. DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.03.008.

47. Sugonyako I.S., Morkina A.Yu., Tarov D.V., et al. Review of recent work on electric pulse treatment of steels to improve their properties // *Basic Problems of Material Science*. 22(3), 342–358 (2025). (In Russian) [Сугоняко И.С., Моркина А.Ю., Таров Д.В. и др. Обзор последних работ по электроимпульсной обработке сталей с целью

улучшения их свойств // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 22(3), 342–358 (2025)]. DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.03.010.

48. Semenova M.N., Bebikhov Yu.V., Tatarinov V.P., et al. Review of technology and first results in the field of electropulsed treatment of metals and alloys based on the electroplasticity effect // Basic Problems of Material Science. 23(1), 106–123 (2026). (In Russian) [Семёнова М.Н., Бебихов Ю.В., Татаринов В.П. и др. Обзор технологий и первых результатов в области электроимпульсной обработки металлов и сплавов на основе эффекта электропластичности // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 23(1), 106–123 (2026)]. DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.01.012.

49. Dmitriev S.V., Tatarinov P.S., Tatarinov V.P., et al. Program for the automatic normalization of a current pulse based on the charge of a capacitor bank. Computer program registration certificate RU 2025660558, April

24, 2025. Application No. 2025618911 dated April 17, 2025. (In Russian) [Дмитриев С.В., Татаринов П.С., Татаринов В.П. и др. Программа для автоматической нормировки импульса тока по величине заряда батареи конденсаторов. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025660558, 24.04.2025. Заявка № 2025618911 от 17.04.2025].

50. Dmitriev S.V., Tatarinov P.S., Semenov A.S., et al. Automated laboratory setup for the experimental investigation of electro-pulse metal processing methods. Eurasian invention patent No. 052382, 04.02.2026. Application No. 202591802 dated 09.07.2025. Bulletin No. 2 / 2026. 16 p. (In Russian) [Дмитриев С.В., Татаринов П.С., Семёнов А.С. и др. Автоматизированная лабораторная установка для экспериментального исследования способов электроимпульсной обработки металлов. Евразийский патент на изобретение № 052382, 04.02.2026. Заявка № 202591802 от 09.07.2025. Бюллетень № 2 / 2026. 16 с.].