

Научный обзор

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 620.22

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.01.012

## ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ И ПЕРВЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧНОСТИ

Мария Николаевна Семёнова<sup>1†</sup>, Юрий Владимирович Бебихов<sup>2</sup>,  
Владимир Павлович Татаринов<sup>3</sup>, Павел Семенович Татаринов<sup>4</sup>,  
Илья Анатольевич Якушев<sup>5</sup>, Дина Ураловна Абдуллина<sup>6</sup>, Александр Сергеевич Семёнов<sup>7</sup>,  
Сергей Владимирович Дмитриев<sup>8</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> Политехнический институт (филиал) ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова» в г. Мирном, ул. Ойунского, д. 14, 678170, Мирный, Россия

<sup>6,7,8</sup> Институт физики молекул и кристаллов ФГБУН «Уфимский федеральный исследовательский центр РАН», пр. Октября, д. 71, 450054, Уфа, Россия

<sup>7</sup> Западно-Якутский научный центр Академии наук Республики Саха (Якутия), ул. Тихонова, д. 5, корп. 1, 678170, Мирный, Россия

<sup>8</sup> ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», ул. Космонавтов, д. 1, 450062, Уфа, Россия

<sup>1</sup> mariya\_semyonova86@mail.ru<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-7298-0226>

<sup>2</sup> bebikhov.yura@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8366-4819>

<sup>3</sup> vovatatarnov@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0002-0074-677X>

<sup>4</sup> paveltatarinov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7430-8591>

<sup>5</sup> yakushevilya@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2539-7334>

<sup>6</sup> abdullina.dina-u@net.ugatu.su, <https://orcid.org/0000-0001-6196-6093>

<sup>7</sup> sash-alex@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9940-3915>

<sup>8</sup> dmitriev.sergey.v@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6744-4445>

**Аннотация.** Электропластичность – это повышение деформируемости металла при снижении действующих напряжений во время пропускания через него импульсного электрического тока. Это явление, открытое ещё в 1969 году советским учёным Олегом Троицким, позволяет снизить энергозатраты по сравнению с традиционными методами горячей деформации, так как электрический ток оказывает локальное воздействие именно в зоне деформации, не вызывая значительного нагрева всего объёма образца. Электроимпульсная обработка металлов и сплавов, основанная на электропластическом эффекте, нашла широкое применение в разных отраслях промышленности. Электропластический эффект чаще всего объясняется совместным воздействием тепловых и атермических эффектов, а также воздействием магнитного поля. Целью данного обзора был анализ работ по открытию и изучению электропластического эффекта, объяснению и приведению примеров электроимпульсной обработки металлов и сплавов, рассмотрению областей применения, таких как залечивание трещин контактным и бесконтактным способами, растворение включений и модификация структуры, а также описание первых работ и начинаний авторского коллектива в области физических основ энергосберегающей технологии формоизменения металлов на основе эффекта электропластичности. Были рассмотрены первые полученные результаты, связанные с исследованиями прироста деформации растяжения для меди и алюминия при повторяющихся импульсах тока. Представлены программы для ЭВМ и патенты на изобретение в области автоматизации работы лабораторной установки для исследования эффекта электропластичности. Показаны результаты экспериментальных исследований влияния импульсов электрического тока на эффект пружинения пластин из титанового сплава. Апробированы подходы к определению параметров самовосстановления усталостных трещин с помощью электрического импульса. Произведено моделирование процесса разряда конденсаторной батареи через образец в виде медной проволоки. Также показаны перспективы продолжения исследований в области бесконтактной электроимпульсной обработки металлов и сплавов и улучшения их коррозионных свойств.

**Ключевые слова:** электропластический эффект, электроимпульсная обработка, деформация, микроструктура, дефекты, трещины, коррозия, импульсный ток, металлы, сплавы, компьютерное моделирование.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-22-00690, <https://rscf.ru/project/25-22-00690/>

**Для цитирования:** Семёнова М.Н., Бебихов Ю.В., Татаринов В.П., Татаринов П.С., Якушев И.А., Абдуллина Д.У., Семёнов А.С., Дмитриев С.В. Обзор технологий и первых результатов в области электроимпульсной обработки металлов и сплавов на основе эффекта электропластичности // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2026. Т. 23. № 1. С. 106-123. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.01.012.

Review article

## REVIEW OF TECHNOLOGY AND FIRST RESULTS IN THE FIELD OF ELECTROPULSED TREATMENT OF METALS AND ALLOYS BASED ON THE ELECTROPLASTICITY EFFECT

Maria N. Semenova<sup>1†</sup>, Yuri V. Bebikhov<sup>2</sup>, Vladimir P. Tatarinov<sup>3</sup>, Pavel S. Tatarinov<sup>4</sup>,  
Пяа А. Yakushev<sup>5</sup>, Dina U. Abdullina<sup>6</sup>, Alexander S. Semenov<sup>7</sup>, Sergey V. Dmitriev<sup>8</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> Polytechnic Institute (branch) in Mirny, Ammosov North-Eastern Federal University, Oyunskogo str., 14, 678170, Mirny, Russia

<sup>6,7,8</sup> Institute of Molecule and Crystal Physic, Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Oktyabrya Ave., 71, 450054, Ufa, Russia

<sup>7</sup> Western Yakut Scientific Center, Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Tikhonova str., 5/1, 678170, Mirny, Russia

<sup>8</sup> Ufa State Petroleum Technological University, Kosmonavtov str., 1, 450062, Ufa, Russia

<sup>1</sup> mariya\_semyonova86@mail.ru<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-7298-0226>

<sup>2</sup> bebikhov.yura@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8366-4819>

<sup>3</sup> vovattatarinov@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0002-0074-677X>

<sup>4</sup> paveltatarinov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7430-8591>

<sup>5</sup> yakushevilya@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2539-7334>

<sup>6</sup> abdullina.dina-u@net.ugatu.su, <https://orcid.org/0000-0001-6196-6093>

<sup>7</sup> sash-alex@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9940-3915>

<sup>8</sup> dmitriev.sergey.v@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6744-4445>

**Abstract.** Electroplasticity is an increase in the deformability of a metal with a reduction in the applied stresses during the passage of a pulsed electric current. This phenomenon, discovered in 1969 by Soviet scientist Oleg Troitsky, reduces energy consumption compared to traditional hot deformation methods, as the electric current exerts a localized effect precisely in the deformation zone, without causing significant heating of the entire sample. Electric pulse machining of metals and alloys, based on the electroplastic effect, has found wide application in various industries. The electroplastic effect is most often explained by the combined effects of thermal and athermal effects, as well as the influence of a magnetic field. The purpose of this review was to analyze works on the discovery and study of the electroplastic effect, explain and provide examples of electropulse processing of metals and alloys, consider areas of application such as contact and contactless crack healing, inclusion dissolution, and structural modification, as well as describe the initial work and initiatives of the authors' team in the field of the physical foundations of energy-saving technology for metal forming based on the electroplasticity effect. The first results obtained related to studies of the increment of tensile strain for copper and aluminum under repeated current pulses were considered. Computer programs and patents for inventions in the field of automation of a laboratory setup for studying the electroplasticity effect are presented. The results of experimental studies of the effect of electric current pulses on the springback effect of titanium alloy plates are presented. Approaches to determining the parameters of self-healing of fatigue cracks using an electric pulse are tested. The process of discharging a capacitor bank through a copper wire sample is simulated. Prospects for continued research in the field of contactless electropulse machining of metals and alloys and improving their corrosion properties are also highlighted.

**Keywords:** electroplastic effect, electropulse treatment, deformation, microstructure, defects, cracks, corrosion, pulsed current, metals, alloys, computer modeling.

**Acknowledgements:** The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 25-22-00690, <https://rscf.ru/en/project/25-22-00690/>

**For citation:** Semenova M.N., Bebikhov Yu.V., Tatarinov V.P., Tatarinov P.S., Yakushev I.A., Abdullina D.U., Semenov A.S., Dmitriev S.V. (2026). Review of technology and first results in the field of electropulsed treatment of metals and alloys based on the electroplasticity effect. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 23(1), 106-123. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.01.012.

## Введение

Физические основы энергосберегающей технологии формоизменения металлов на основе эффекта электропластичности (электропластической деформации) заключаются в снижении сопротивления металла пластической деформации под действием электрического тока. Это явление, открытое ещё в 1969 году советским учёным Олегом Троицким, позволяет снизить энергозатраты по сравнению с традиционными методами горячей деформации, так как электрический ток оказывает локальное воздействие именно в зоне деформации, не вызывая значительного нагрева всего объёма заготовки [1-3].

Эффект электропластичности обусловлен несколькими факторами: локальный нагрев металла в местах скопления дефектов кристаллической решётки, что облегчает их движение и перестройку; направленное движение электронов («электронный ветер»), которое оказывает дополнительное воздействие на дислокации в металле; электромагнитные силы, возникающие при прохождении тока, способствуют перемещению атомов в кристаллической решётке. В результате металл становится более пластичным и менее хрупким, что позволяет снизить усилия деформации на 20÷40%, что даёт возможность использовать менее мощное оборудование и повышает стойкость инструмента [4-6].

Для реализации эффекта электропластичности при обработке металлов давлением должны выполняться следующие условия: заготовка должна находиться под механическими напряжениями выше предела текучести; импульсный ток низкого напряжения (20÷25 В) и высокой плотности должен подаваться непосредственно в зону деформации; форма импульсов должна быть прямоугольная или трапециевидная; длительность импульсов составлять примерно  $10^{-4}$  с, чтобы не возникал значительный сопутствующий нагрев; амплитудная плотность тока должна быть достаточно большая (не менее  $10^5 \div 10^6$  А/см<sup>2</sup>); частота импульсов тока должна составлять, как правило,  $10^2 \div 10^3$  Гц, чтобы все участки быстро движущейся сквозь зону деформации заготовки успевали подвергаться действию тока [7-9].

Технология электропластической деформации применяется в различных областях промышленности: в металлургии – для улучшения пластичности труднодеформируемых сплавов при прокатке, волочении, прессовании; в ма-

шиностроении – для изготовления деталей сложной формы, особенно из высокопрочных материалов; при видах обработки металлов и сплавов, которые связаны с удалением части материала заготовки, например, при резке, проточке, фрезеровании, сверлении; при выполнении технологических операций для неразъёмного и разъёмного соединения нескольких деталей из одинакового или различных материалов [10, 11].

Энергоэффективность процесса электропластической деформации обусловлена тем, что электрический ток оказывает локальное воздействие именно в зоне деформации, что позволяет снизить энергозатраты на 30÷50% по сравнению с традиционными методами горячей деформации [12].

## 1. Открытие и изучение электропластического эффекта

Электропластичность – это повышение деформируемости металла при снижении действующих напряжений во время пропускания через него импульсного электрического тока. Электропластический эффект (ЭЭ) в металлах был открыт Троицким О.А. в 1969 году при воздействии одиночных импульсов тока плотности  $10^3$  А/мм<sup>2</sup> и длительностью  $10^{-4}$  секунд во время деформации растяжения и сжатия кристалла цинка [13].

На графике (рис. 1) в виде первичной диаграммы растяжения показаны первые результаты экспериментальных исследований Троицкого. Видно, что после упругой области наблюдаются скачки деформации, возрастающие по своей величине с ростом напряжения на клеммах разрядного устройства.

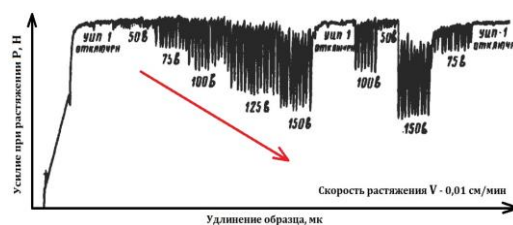


Рис. 1. Диаграмма растяжения монокристаллов цинка (взято из [13])

Fig. 1. Stress-strain diagram of zinc single crystals (taken from [13])

Величина таких деформационных скачков свидетельствует о значительном приращении пластической деформации в момент прохождения импульса тока.

Существуют две гипотезы, пытающиеся объяснить ЭЭ: теория электронного ветра; эффект неоднородного выделения джоулева тепла.

На левой диаграмме (рис. 2, а) виден рост числа публикаций в МБД Scopus по электропластичности за последние годы [14]. Это говорит о повышении интереса к данной теме. На соседней диаграмме (рис. 2, б) показано распределение частоты использования различных методов исследования ЭЭ.

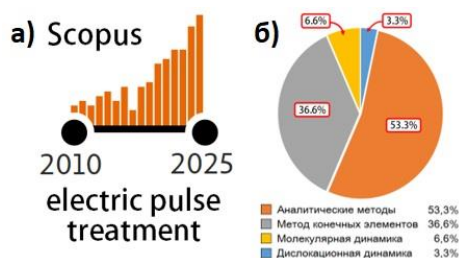


Рис. 2. Анализ публикаций по электропластичности в МБД Scopus

Fig. 2. Analysis of publications on electroplasticity in the Scopus

ЭЭ наиболее эффективен в среднем и мелком металлургическом переделе, поскольку быстропеременный ток выталкивается на поверхность металла (скин-эффект). Его применение рекомендовано для таких технологических процессов, как волочение, прокатка, штамповка и др., где толщина обрабатываемого металла невелика [15]. На рисунке 3 показаны схемы подвода тока при прокатке [16].

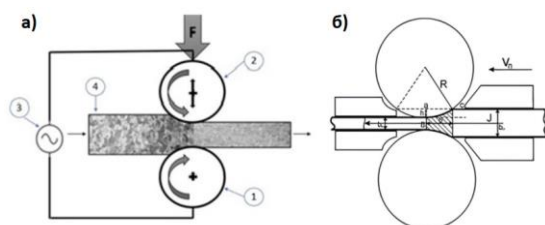


Рис. 3. Схема подвода тока при прокатке: (а) от валика 1 к валику 2, (б) скользящие контакты (взято из [16])

Fig. 3. The current supply scheme for rolling: (a) from roll 1 to roll 2, (b) sliding contacts (taken from [16])

## 2. Объяснение и примеры электроимпульсной обработки

На структурной схеме (рис. 4) наглядно показана деформация без протекания электрического тока и с ним. Сверху наблюдается увеличение внутреннего напряжения, деформация и разрушение. Снизу же наблюдаем термический и атермический эффект, деформацию при серии импульсов и увеличение формуемости [17].

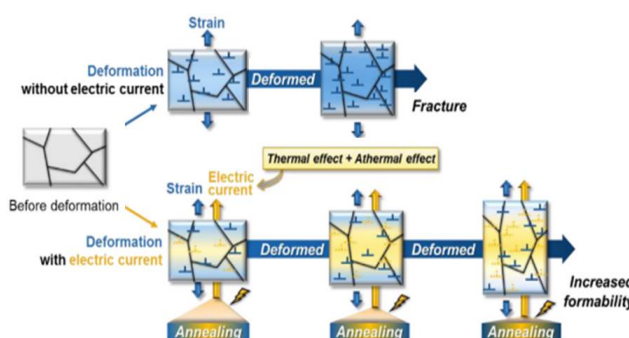
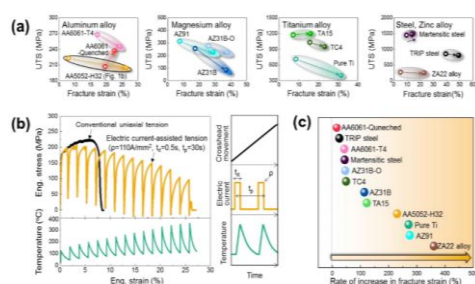


Рис. 4. Схематическое изображение электропластичности, показывающее, как электрический ток влияет на микроструктуру и механическое поведение во время пластической деформации (взято из [17])

Fig. 4. Schematic illustration of electroplasticity, indicating how electric current affects the microstructure and mechanical behavior during plastic deformation (taken from [17])

На рисунке 5 (а) показаны графические зависимости предела прочности на растяжение от деформации для различных сплавов: алюминиевых, магниевых, титановых и чистого титана, стальных и цинкового. После электроимпульсной обработки (ЭИО), параметры которой показаны на рисунке 5 (б), на рисунке 5 (с) наблюдается увеличение деформации до разрушения практически для всех образцов.



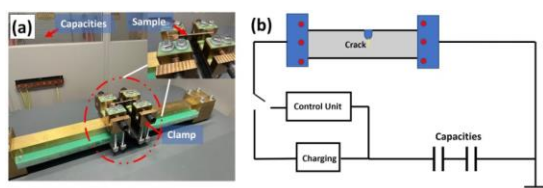
**Рис. 5.** (а) Сравнение деформации при разрушении и предела прочности при растяжении; (б) Инженерные кривые напряжение-деформация и выбранные электрические условия (плотность электрического тока =  $110 \text{ A/mm}^2$ ); (с) Скорость увеличения деформации при разрушении при приложении электрического тока в одноосном испытании на растяжение (взято из [17])

**Fig. 5.** (a) Comparison of fracture strain and ultimate tensile strength, (b) Engineering stress-strain curves and selective electrical condition (electric current density =  $110 \text{ A/mm}^2$ ), (c) Rate of increase in fracture stain by applying electric current in uniaxial tensile test (taken from [17])

### 3. Области применения

#### 3.1. Залечивание трещин контактным и бесконтактным способами

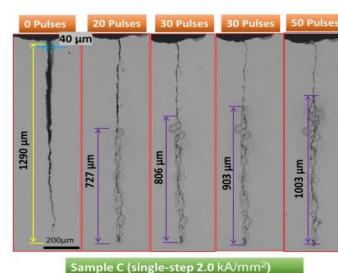
В работе [18] показаны результаты залечивания трещин контактным подведением тока. На рисунке 6 показана установка для электроимпульсной обработки (а) и её принципиальная схема (б).



**Рис. 6.** Установка для электроимпульсной обработки контактным способом (а) и её принципиальная схема (б) (взято из [18])

**Fig. 6.** Installation for electric pulse processing by contact method (а) and its basic diagram (b) (taken from [18])

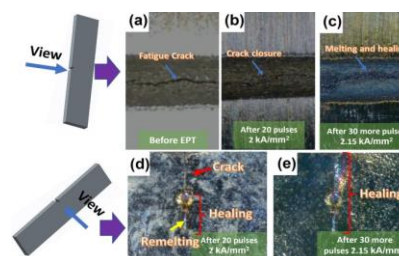
На рисунке 7 представлены изображения, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), показывающие изменения характеристик усталостной трещины до и после ЭИО в зависимости от количества импульсов при средних плотностях тока.



**Рис. 7.** Изображения СЭМ в режиме обратного рассеяния, показывающие изменения характеристик усталостных трещин до и после ЭИО в зависимости от количества импульсов при средних плотностях тока (взято из [18])

**Fig. 7.** SEM-backscattered images showing the changes in fatigue crack characteristics before and after EPT as a function of the number of pulses at medium current densities (taken from [18])

На рисунке 8 приведены изображения, полученные с помощью цифрового микроскопа, показывающие усталостную трещину, рассматриваемую с двух сторон надреза в образце.



**Рис. 8.** Изображения, полученные с помощью цифрового микроскопа, показывающие усталостную трещину, рассматриваемую с двух сторон надреза в образце: (а) до ЭПТ (б, d) после 20 импульсов с плотностью тока  $2 \text{ kA/mm}^2$  (с, е) после еще 30 импульсов с плотностью тока  $2,15 \text{ kA/mm}^2$  (взято из [18])

**Fig. 8.** Images taken by digital microscope showing the fatigue crack viewing from both sides of the notch in sample: (а) before EPT (b, d) after 20 pulses with a current density of  $2 \text{ kA/mm}^2$  (с, е) after 30 more pulses with a current density  $2.15 \text{ kA/mm}^2$  (taken from [18])

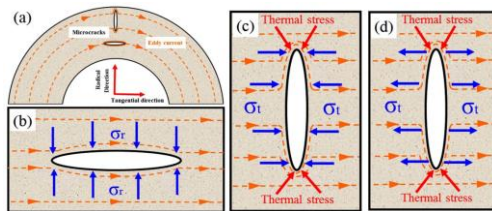
В работах [19, 20] показаны результаты залечивания трещин токами Фуко (бесконтактным способом). Механизм залечивания заключается в концентрации тока в вершине трещины. На рисунке 9 показана схема ЭИО, где трубчатые образцы были закреплены на валу из нержавеющей стали внутри медной катушки.



**Рис. 9.** Схема ЭИО при залечивании трещин бесконтактным способом (взято из [19])

**Fig. 9.** Scheme of EPT for healing cracks using a contactless method (taken from [19])

На рисунке 10 (а) показаны две микротрещины: одна радиальная, другая тангенциальная, расположенные на поперечном сечении. На рисунке 10 (b) видно распределение напряжений вокруг тангенциальной микротрещины, а на (c) и (d) распределение напряжений вокруг радиальной микротрещины в схеме внутреннего и внешнего воздействия.

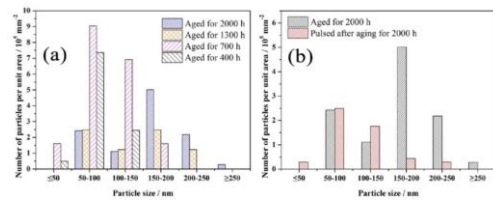


**Рис. 10.** (а) Радиальные и тангенциальные микротрещины на поперечном сечении; (b) Распределение напряжений вокруг тангенциальной микротрещины; (c, d) Распределение напряжений вокруг радиальной микротрещины в схеме внутреннего и внешнего воздействия (взято из [20])

**Fig. 10.** (a) Radial and tangential microcracks on the cross section; (b) Stress distribution around the tangential microcrack; (c, d) Stress distribution around the radial microcrack in the scheme of internal and external influences (taken from [20])

### 3.2. Растворение включений и модификация структуры

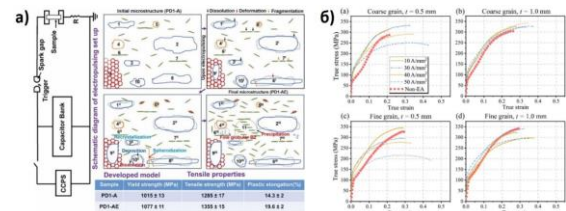
В работе [21] (рис. 11) показаны результаты ЭИО для растворения включений в твердом растворе. Как испытания на погружение, так и электрохимические испытания показали положительный сдвиг потенциала коррозии и снижение плотности тока коррозии, вызванные электроимпульсной обработкой, а также улучшение коррозионной стойкости.



**Рис. 11.** Распределение количества и размеров осадков при различных условиях обработки: (а) термическая обработка с различной продолжительностью и (б) электроимпульсная обработка (взято из [21])

**Fig. 11.** Number and size distributions of precipitates under different treatment conditions: (a) aging treatment with different durations and (b) electropulsing treatment (taken from [21])

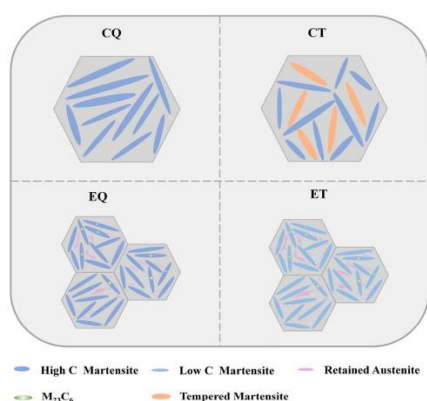
В работе [22] (рис. 12, а) показаны результаты ЭИО дуплексной стали для её упрочнения и улучшения пластичности, что можно наблюдать на кривых напряжения-деформации (рис. 12, б). При испытаниях на растяжение фольги AZ31 получены различные размеры и толщина зерна.



**Рис. 12.** а) Схема установки для электроимпульсной обработки и физическая модель различных микроструктур; б) Кривые напряжение-деформация (взято из [22])

**Fig. 12.** a) Schematic of the electropulsing setup and Physical model of different microstructures; b) Stress-strain curves (taken from [22])

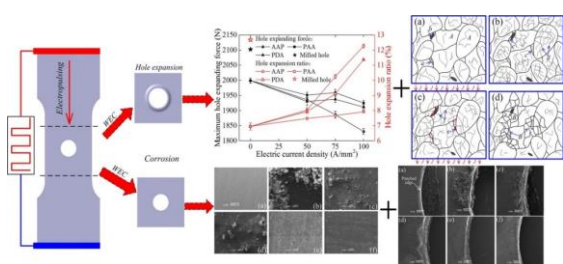
В работе [23] (рис. 13) произведено индуцирование образования остаточного аустенита после электроимпульсной обработки для улучшения свойств AISI 420 стали, а именно нержавеющая сталь AISI 420 со сверхвысокой прочностью (1720 МПа) и удлинением 7,9 % была получена методом электроимпульсного закалывания. После электроимпульсного закалывания с последующим отпуском объемная доля аустенита увеличилась с 4,4 % до 11,8 %.



**Рис. 13.** Схематическое изображение эволюции микроструктур при различных видах термической обработки (взято из [23])

**Fig. 13.** Schematic diagram of the evolution of different heat treatment microstructures (taken from [23])

В работе [24] (рис. 14) применена электроимпульсная обработка для улучшения коррозионных свойств алюминиевого сплава 2024Т4. Экспериментальные результаты показали, что улучшение растяжимости кромок зависит от способа применения электроимпульсной обработки и плотности электрического тока. Установлено, что коррозионная стойкость штампованных деталей после обработки электроимпульсами повышается, причем степень улучшения коррозионной стойкости становится более заметной с увеличением времени обработки электроимпульсами.



**Рис. 14.** Схема процесса подготовки и процесса коррозионного погружения штампованной детали, влияние режимов применения электроимпульсного воздействия и ЭДС на максимальную силу расширения отверстия (взято из [24])

**Fig. 14.** The schematic diagram of preparation process and immersion corrosion process of punched part, effect of patterns of applying electropulsing and ECDs on the maximum hole expanding force (taken from [24])

Таким образом, было отмечено, что применение электроимпульсной обработки металлов

и сплавов является весьма перспективным научным направлением для дальнейшего более детального изучения, в результате чего начаты собственные исследования коллективом авторов.

#### 4. Обзор первых полученных результатов

Целью первых исследований являлось экспериментальное изучение влияния импульсного тока высокой плотности различной длительности на деформацию медных и алюминиевых проволочных образцов для последующей разработки теоретического фундамента электростимулированной обработки металлов давлением. Основными задачи стали: определение нагрева образцов в зависимости от заряда конденсатора; экспериментальное изучение эффекта электропластичности на медных и алюминиевых проводах, растягиваемых мертвым грузом; анализ влияния повторяющихся импульсов при заданном растягивающем напряжении. Первой совместной работой стало написание обзорной статьи [25].

Предпосылками для научного сотрудничества в области изучения электропластического эффекта между ИФМК УФИЦ РАН и МПТИ (ф) СВФУ послужило наличие опыта и компетенций в области разработки силовых частей различных лабораторных установок, т.к. на кафедре «Электроэнергетики и автоматизации промышленного производства» МПТИ (ф) СВФУ в 2020-2022 годах велись работы по изучению шаровой молнии, а точнее её лабораторного аналога – гатчинского разряда [26-29]. В последствии между институтами было подписано соглашение о сотрудничестве.

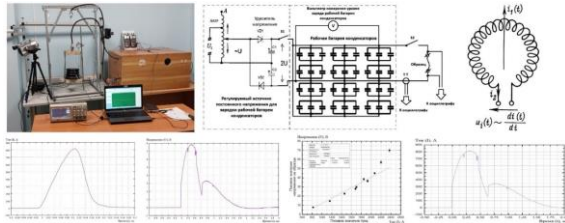


**Рис. 15.** Результаты изучения лабораторного аналога шаровой молнии (взято из [26, 28])

**Fig. 15.** Results of a study of a laboratory analogue of ball lightning (taken from [26, 28])

Первые работы, связанные с электропластичностью, на кафедре ЭиАПП МПТИ (ф) СВФУ начались со сбора лабораторной установки. Первые эксперименты относились к

изучению электрических параметров [30], а именно влиянию величины и длительности импульса тока, величины напряжения и электроёмкости, численного и компьютерного моделирования (рис. 16).

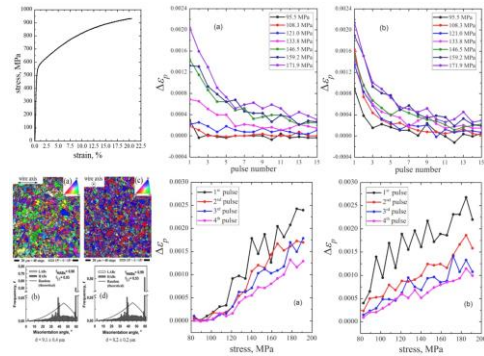


**Рис. 16.** Первая установка для изучения электропластичности и её силовая схема, а также результаты измерения тока большой величины с помощью пояса Роговского (взято из [30])

**Fig. 16.** The first setup for studying electroplasticity and its power circuit, as well as the results of measuring high current using a Rogowski coil (taken from [30])

Первыми результатами [31] стали измерения мгновенной деформации образцов из медной проволоки диаметром 1 и 2 мм в состоянии поставки и после отжига. Измерения проводились для различной скорости деформации на стадии установившейся ползучести и для различных значений напряжения на конденсаторной батарее. Образец имел длину 400 мм, испытания проходили при комнатной температуре. Во всех случаях нагрев образцов за счёт прохождения импульса тока был незначительным и не превышал 40°C. В результате исследований было отмечено близкое к линейному увеличение удлинения с ростом напряжения на конденсаторе, а также с некоторым ускорением данной зависимости для больших напряжений (140 и 160 В). Увеличение скорости деформации ползучести с  $\varepsilon=10^{-5}$  до  $\varepsilon=5 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$  привело примерно к четырехкратному увеличению скачка деформации, вызванного импульсом тока.

В работе [32, 33] нами использовалась медь М1, имеющая предел текучести 125 МПа. На рисунке 17 (слева сверху) показана диаграмма растяжения медной проволоки. Длина образцов составляла 350 мм. Микроструктура медной проволоки показана в левой нижней части рисунка 17, где (а) и (с) карты распределения ориентации зерен, (b) и (d) распределение границ зерен в зависимости от угла разориентации.

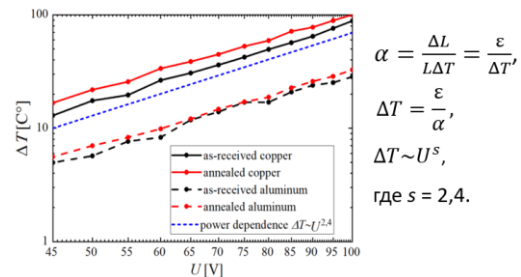


**Рис. 17.** Диаграмма растяжения медной проволоки, её микроструктура и графики увеличения пластической деформации при растяжении (взято из [32])

**Fig. 17.** Tensile stress–strain diagram of copper wire, its microstructure, and graphs of plastic strain increase under tension (taken from [32])

На графиках (рис. 17) справа сверху показано увеличение пластической деформации при растяжении в зависимости от количества электрических импульсов при разных значениях фиксированного растягивающего напряжения. Снизу видна зависимость приращения пластической деформации при растяжении от напряжения. На рисунках (а) показаны результаты для проволоки в состоянии поставки, а на (b) – в отожжённом состоянии.

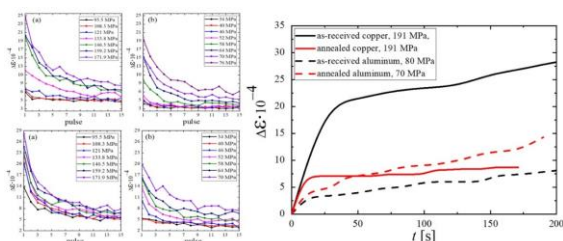
В работах [34–36] нами помимо медных образцов, также использовались образцы из алюминия. Была определена зависимость изменения температуры образцов меди и алюминия от напряжения на батарее конденсаторов (рис. 18). Синяя пунктирная линия показывает степенную зависимость  $\Delta T$  от  $U$ . Изменение температуры рассчитывалось через коэффициент теплового расширения.



**Рис. 18.** График зависимости изменения температуры образцов меди и алюминия от напряжения на батарее конденсаторов (взято из [34])

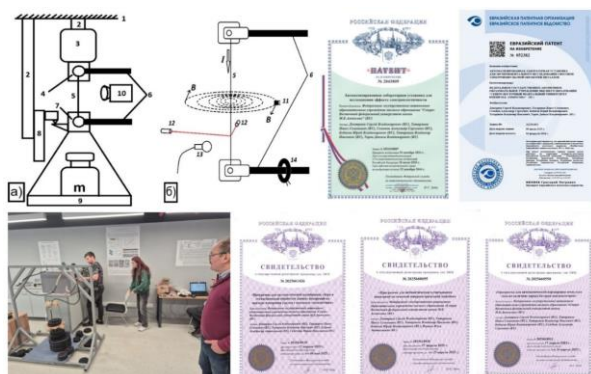
**Fig. 18.** Graph of the dependence of the temperature change of copper and aluminum samples on the voltage on the capacitor bank (taken from [34])

На следующих графиках (рис. 19) показан прирост деформации растяжения для Cu (а) и Al (б) при повторяющихся импульсах тока, в исходном и отожжённом состояниях, соответственно. Также справа на рисунке 19 показана зависимость для скорости ползучести образцов после импульса электрического тока.



**Рис. 19.** Графики зависимости прироста деформации растяжения для Cu (а) и Al (б), зависимость для скорости ползучести образцов после импульса электрического тока (взято из [34])

**Fig. 19.** Graphs of the increase in tensile strain for Cu (а) and Al (б), dependence for the creep rate of samples after an electric current pulse (taken from [34])



**Рис. 20.** Схемы автоматизированной лабораторной установки: а) механическая часть, б) расположение датчиков (взято из [42]); отписки патентов и свидетельств на программы для ЭВМ

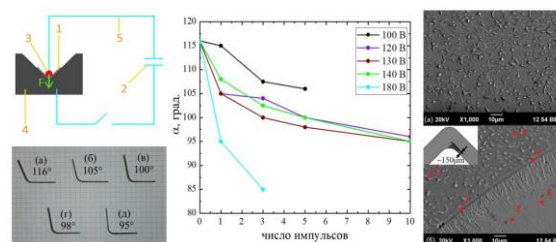
**Fig. 20.** Schemes of the automated laboratory setup: а) mechanical part, б) arrangement of sensors (taken from [42]); patent imprints and certificates for computer programs

Продолжением работы стала модификация лабораторной установки, а также разработка и патентование автоматизированной лабораторной установки для исследования эффекта электропластичности [37]. Вместе с ней было разработано 3 программы для ЭВМ [38-40]. Работа по модернизации установки была продолжена в результате чего был получен Евразийский па-

тент «Автоматизированная лабораторная установка для экспериментального исследования способов электроимпульсной обработки металлов» [41].

## 5. Обзор результатов экспериментальных исследований

В работах [43, 44] представлены результаты экспериментальных исследований влияния импульсов электрического тока на эффект сужения пластин из титанового сплава, а именно в работе [44] исследовались пластины из титанового сплава марки ВТ6 после гибки в V-образной матрице с углом  $90^\circ$  и радиусом кривизны 5 мм. На рисунке 21 (слева сверху) схематически показана оснастка для гибки. Ниже показаны примеры образцов после изгиба без тока (а) и после прохождения импульсов тока в количестве: (б) – 1, (в) – 3, (г) – 5 и (д) – 10, при напряжении 130 В. Также показано изменение угла изгиба  $\alpha$  образцов в зависимости от количества импульсов тока для различных значений напряжения на конденсаторной батарее. В правой части рисунка 21 показаны РЭМ-изображения микроструктуры (а) исходного состояния и (б) границы между зонами, подвергшейся (нижняя) и не подвергшейся (верхняя) температурному воздействию для пластины, подвергнутой электроимпульсной обработке в изогнутом состоянии.

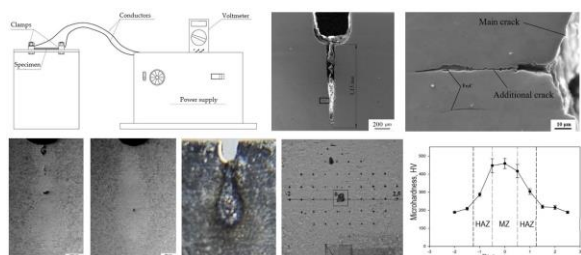


**Рис. 21.** Схема оснастки для гибки и подвода тока, графики изменения угла изгиба и РЭМ-изображения микроструктуры образцов (взято из [44])

**Fig. 21.** Schematic diagram of the equipment for bending and current supply, graphs of the change in bending angle and SEM images of the microstructure of the samples (taken from [44])

В работах [45-47] были опробованы подходы к определению параметров самовосстановления усталостных трещин с помощью электрического импульса. В работе, представленной в виде препринта [47], усталостная трещи-

на длиной 1,13 мм в стальной пластине марки 09Г2С была полностью залечена с помощью обработки импульсным током. Использовались следующие параметры импульсного тока: количество импульсов – 6, длительность импульса –  $10^{-4}$  с, напряжение на конденсаторе увеличивалось от импульса к импульсу в диапазоне от 200 до 250 В, максимальная плотность тока составляла от  $10^3$  до  $1,25 \cdot 10^3$  А/мм<sup>2</sup>. Результаты анализа залеченной трещины выявили специфические структурные и фазовые превращения (рис. 22).



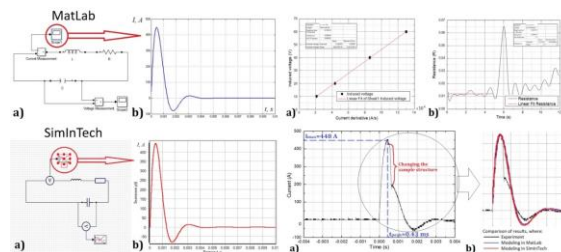
**Рис. 22.** Схема электроимпульсной обработки образца; оптическое изображение трещины, залеченной шестью импульсами тока; изображения микроструктуры после залечивания трещины; карта точек, в которых проводились измерения, и распределение микротвёрдости вдоль направления, перпендикулярного зажившей трещине (взято из [47])

**Fig. 22.** Schematic diagram of the electric pulse treatment of the sample; optical image of a crack healed by six current pulses; images of the microstructure after crack healing; map of the points at which measurements were taken, and the distribution of microhardness along the direction perpendicular to the healed crack (taken from [47])

Образование мартенсита с повышенной микротвёрдостью в области залеченной трещины может снизить усталостную прочность образца. С другой стороны, мартенсит обладает более высокой коррозионной стойкостью.

В работах [48, 49] произведено моделирование процесса разряда конденсаторной батареи через образец в виде медной проволоки. При помощи метода наименьших квадратов и дискретного преобразования Фурье, были оценены параметры индуктивности и сопротивления всей системы. После чего индуктивность была определена численно. Разработаны две идентичные имитационные модели в пакете программ MatLab (сверху) и среде SimInTech (снизу) (рис. 23). Получили практически пол-

ное предсказание обеими моделями таких параметров, как пиковое значение тока и длина импульса в пределах погрешности измерительного оборудования.



**Рис. 23.** Модели и результаты моделирования процесса разряда конденсаторной батареи через образец в виде медной проволоки в MatLab и SimInTech (взято из [49])

**Fig. 23.** Models and simulation results of the process of discharging a capacitor bank through a copper wire sample in MatLab and SimInTech (taken from [49])

## 6. Перспективы продолжения исследований

В настоящее время командой авторов ведётся разработка оборудования для электроимпульсной обработки металлов бесконтактным способом. В первых экспериментах использовался тот же силовой блок, но вместо контактных клемм применялся специальный индуктор для подведения к образцу энергии электромагнитного импульса бесконтактным способом (рис. 24). Использовались три индуктора, отличающихся числом витков (два, три и четыре).



**Рис. 24.** Схема установки и подвода тока при бесконтактном способе ЭИО, индукторы и образцы  
**Fig. 24.** Installation and current supply diagram for the contactless EPT method, inductors and samples

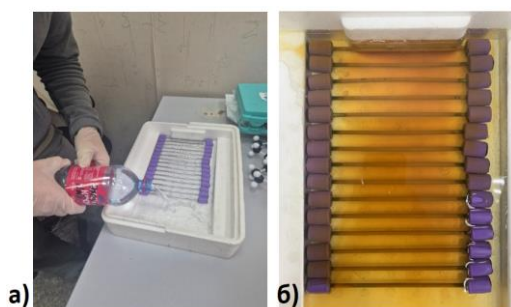
С увеличением числа витков возрастают омическое сопротивление индуктора и его ин-

дуктивное сопротивление переменному току. Это означает, что с ростом числа витков замедляется скорость разряда конденсатора и, следовательно, растёт длительность электрического импульса при той же энергии импульса.

Проведенные эксперименты позволили определить слабые места индукторов по отношению к механическим нагрузкам и предельно допустимые токи для них. Все три индуктора в результате многочисленных испытаний, в конце концов, вышли из строя по разным причинам. Работа в этом направлении будет продолжена.

Также авторами в настоящее время проводится очередной эксперимент, но по нему ещё нет итоговых результатов. Как уже отмечалось ранее, электроимпульсная обработка может применяться для улучшения коррозионных свойств металлов и сплавов [50-52]. Было принято решение самостоятельно проверить эту теорию. Были взяты 15 образцов из ржавеющей стальной проволоки, некоторые из которых подверглись электроимпульсной обработке, а некоторые нет.

На рисунке 25 (а) показано как обработанные и промаркированные образцы были погружены в ванночку и залиты 3,5 % соляным раствором. Уже через 3 суток (рис. 25, б) образцы подверглись коррозии.



**Рис. 25.** Исходные образцы, погруженные в соляной раствор (а); образцы после коррозирования (б)

**Fig. 25.** Original samples immersed in salt solution (а); samples after corrosion (b)

Для оценки скорости коррозии нами использовался самый простой гравиметрический метод, заключающийся в измерении массы образца до и после воздействия агрессивной среды. Получены первые потери в весе, оцениваемые примерно в 0,0001 от исходного. Работа продолжится с интенсивностью измерений в 3 дня до получения существенных результатов.

## Заключение

В результате обзора существующих технологий и уже проведённых нами исследований в области электроимпульсной обработки металлов можно сделать следующие выводы: электропластический эффект позволяет повышать пластичность металлов без нагрева; электроимпульсная обработка, за счет локального выделения тепла на дефектах, позволяет решать такие задачи как растворение частиц, совершенствование границ зерен, релаксацию дефектов, повышение коррозионной стойкости; повторяющиеся импульсы тока при постоянном механическом напряжении дают прирост деформации, уменьшающийся с каждым импульсом, поскольку дислокации достигают более сильных стопоров; показано, что электропластический эффект проявляется ярче с повышением плотности тока, без значительного увеличения выделения тепла; получены положительные результаты по ослаблению пружинения в титановом сплаве и залечиванию макротрещины в стальной пластине после пропуска импульсного тока; разработана компьютерная модель, предсказывающая пиковое значение и длину импульса тока при разряде конденсаторной батареи через образец, что будет очень важно при разработке новых и модернизации старых лабораторных установок.

## Список литературы

1. Троицкий О.А. Электропластический эффект в металлах // Черная металлургия. 2018. № 9. С. 65-76.
2. Пономарев Т.С., Белявин К.Е., Минько Д.В., Корольков О.Е., Столяров В.В. Электропластический эффект при изгибе проволоки из вольфрама // Актуальные проблемы прочности: материалы международной научной конференции. Под редакцией В.В. Рубаника. 2020. С. 296-298.
3. Пономарев Т.С., Белявин К.Е., Минько Д.В., Угурчиев У.Х., Столяров В.В. Электропластический эффект при растяжении титановой проволоки // Перспективные материалы и технологии: сборник материалов международного симпозиума. Под общей редакцией В.В. Рубаника. 2019. С. 507-509.
4. Астанин В.В., Хайруллина Д.Р., Павлова Т.Е., Козлов Е.Д., Мингажев А.Д. Электропластический эффект в процессе

- электромагнитной формовки // *Materials Technologies. Design*. 2024. Т. 6. № 3 (18). С. 5-17.
5. Хайруллина Д.Р., Павлова Т.Е., Козлов Е.Д., Мингажев А.Д., Маслова Л.И. Электропластический эффект в технологии электромагнитной штамповки // *Молодой ученый*. 2024. № 25 (524). С. 31-35.
6. Чиченев Н.А., Горовая Т.Ю., Карфидов А.О., Чиченева О.Н. Анализ схем подачи электрического тока к валкам при электропластической прокатки микролент из вольфрама // *Цветные металлы*. 2022. № 6. С. 81-86.
7. Siopis M.S., Kinsey B.L. Experimental Investigation of Grain and Specimen Size Effects during Electrical-Assisted Forming // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2010. V. 132. Is. 2. No. 021004.
8. Вовченко А.И., Демиденко Л.Ю., Половинка В.Д. Влияние параметров импульсов тока на развитие физического контакта при сварке металлов давлением // *Электронная обработка материалов*. 2013. № 49(4). С. 30-34.
9. Минько Д.В. Анализ перспектив применения электропластического эффекта в процессах обработки металлов давлением // *Литье и металлургия*. 2020. № 4. С. 125-130.
10. Почивалов Ю.И. Структура и свойства малолегированной стали 10Г2ФБЮ после прокатки в рельефных валках в условиях электропластичности // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2023. Т. 66. № 6. С. 659-665.
11. Савенко В.С., Чэнь Я. Повышение эксплуатационных характеристик алюминия путем электропластической деформации // *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук*. 2024. Т. 69. № 4. С. 286-296.
12. Ruskiewicz B.J., Mears L., Grimm T., Roth J.T., Ragai I. A review of electrically-assisted manufacturing with emphasis on modeling and understanding of the electroplastic effect // *Journal of Manufacturing Science and Engineering. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*. 2017. V. 139. Is. 11. No. 110801.
13. Троицкий О.А. Электромеханический эффект в металлах // *Письма в ЖЭТФ*. 1969. Т. 2. № 10. С. 18-22.
14. Izadpanah S., Cao X., An D., Li X., Chen J. One step forward to electrically assisted forming mechanisms and computer simulation: A review // *Advanced Engineering Materials*. 2023. V. 25. Is. 5. No. 2200425.
15. Корольков О.Е., Мисоченко А.А., Столяров В.В. Электропластический эффект в титане при сжатии // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2024. Т. 90. № 12. С. 65-71.
16. Stolyarov V., Misochenko A. A pulsed current application to the deformation processing of materials // *Materials*. 2023. V. 16. Is. 18. No. 6270.
17. Kim M.-J., Yoon S., Park S., Jeong H.-J., Park J.-W., Kim K., Jo J., Heo T., Hong S.-T., Cho S.H., Kwon Y.-K., Choi I.-S., Kim M., Han H.N. Elucidating the origin of electroplasticity in metallic materials // *Applied Materials Today*. 2020. V. 21. No. 100874.
18. Cai Q., Zhou M., Bagherpour E., Hosseini S., Mendis C., Chang I., Assadi H. New Insight into Crack-Healing Mechanism via Electropulsing Treatment // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2023. V. 54. P. 2960-2974.
19. Xu W., Yang C., Yu H., Jin X., Yang G., Shan D., Guo B. Combination of eddy current and heat treatment for crack healing and mechanical-property improvement in magnesium alloy tube // *Journal of magnesium and alloys*. 2021. V. 9. Is. 5. P. 1768-1781.
20. Xu W., Yang C., Yu H., Jin X., Guo B., Shan D. Microcrack healing in non-ferrous metal tubes through eddy current pulse treatment // *Scientific Reports*. 2018. V. 8. Is. 1. No. 6016.
21. Cheng X., Zhang X. Anti-corrosion Performance Regeneration in Aged Austenitic Stainless Steel by Precipitate Dissolution Below Critical Temperature Using Electropulsing // *ISIJ International*. 2020. V. 60. Is. 5. P. 1022-1029.
22. Kumar R.P., Santhi Srinivas N.C., Pandey R.K., Manna R. Electropulsing of Low-Density Duplex Steel for Strengthening and Ductilization by Microstructural Refinement // *Journal of Materials Processing Technology*. 2024. V. 329. No. 118423.
23. Fu X., Xu X., Zhao Y., Chen D., Wu Z., Yan X., Zhou Y., Yu Y. Retain the austenite via diffusion control under electropulsing to improve the mechanical properties of the AISI 420 stainless steel // *Journal of Materials Research and Technology*. 2024. V. 29. P. 1665-1674.

24. Tang H., Du H., Tao K., Chen J., Zhang J. Effect of electropulsing on edge stretchability and corrosion resistance near the punched edge of a 2024T4 aluminum alloy sheet // *Journal of Materials Processing Technology*. 2019. V. 263. P. 343-355.
25. Абдуллина Д.У., Бебихов Ю.В., Татаринов П.С., Дмитриев С.В. Обзор последних достижений в области электропластической обработки металлов давлением // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2023. Т. 20. № 4. С. 469-483.
26. Ким Д.Ч., Семёнов А.С., Бебихов Ю.В., Ефимов В.А., Спиридонов В.М., Татаринов П.С. Разработка и испытание установки для изучения лабораторного аналога шаровой молнии // *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова*. 2020. № 6 (80). С. 34-47.
27. Kim, D.C., Semenov, A.S., Efimov, V.A., Bebikhov, Y.V. Installation for Studying the Laboratory Analog of Ball Lightning // *2020 International Multi Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (Fareastcon 2020)*. 2020. No. 9271597.
28. Ким Д.Ч., Семёнов А.С., Бебихов Ю.В., Татаринов П.С. Применение импульсного тиратрона для коммутации гатчинского разряда // *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова*. 2022. № 3 (89). С. 27-38.
29. Kim, D.C., Semenov, A.S., Tatarinov, P.S., Bebikhov, Y.V. Upgrade of High-Voltage Section of Laboratory Unit for Ball Plasmoid Generation // *Proceedings 2022 4th International Conference on Control Systems Mathematical Modeling Automation and Energy Efficiency (Summa 2022)*. 2022. P. 755-759.
30. Татаринов В.П., Татаринов П.С., Бебихов Ю.В., Семёнов А.С., Дмитриев С.В. Разработка способа измерения импульсных токов большой величины // *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова*. 2024. Т. 21. № 1. С. 81-88.
31. Татаринов В.П., Бебихов Ю.В., Татаринов П.С., Золотина К.В., Гуляев Г.С. Экспериментальное исследование электропластического эффекта при прохождении импульсов тока // *Наука и инновационные разработки – Северу: сборник материалов III Международной научно-практической конференции*. 2024. С. 201-205.
32. Dmitriev S.V., Morkina A.Y., Tarov D.V., Khalikova G.R., Abdullina D.U., Tatarinov P.S., Tatarinov V.P., Semenov A.S., Naimark O.B., Khokhlov A.V., Stolyarov V.V. Effect of repetitive high-density current pulses on plastic deformation of copper wires under stepwise loading // *Spectrum of Mechanical Engineering and Operational Research*. 2024. Т. 1. № 1. С. 27-43.
33. Моркина А.Ю., Таров Д.В., Наумова Д.М., Татаринов П.С., Татаринов В.П., Семёнов А.С., Якушев И.А., Дмитриев С.В. Влияние повторяющихся импульсов тока высокой плотности на пластическую деформацию медных проводов // *Известия Уфимского научного центра РАН*. 2024. № 3. С. 15-23.
34. Morkina A.Y., Tarov D.V., Khalikova G.R., Semenov A.S., Tatarinov P.S., Yakushev I.A., Dmitriev S.V. Comparison of the effect of electroplasticity in copper and aluminum // *Facta Universitatis. Series: Mechanical Engineering*. 2024. Vol. 22. No 4. С. 615-632.
35. Morkina A.Y., Tarov D.V., Yakushev I.A., Tatarinov P.S., Korznikova E.A., Dmitriev S.V. Effect of electroplasticity studied for aluminum wires under tension // *Procedia Structural Integrity*. 2024. V. 65. P. 158-162.
36. Morkina A.Y., Tarov D.V., Korznikova E.A., Khazimullin M.V., Semenova M.N., Tatarinov P.S., Yakushev I.A., Dmitriev S.V. Effect of current pulse parameters on the electroplasticity of tensioned copper wires // *European Journal of Mechanics - A/Solids*. 2026. V. 118. No. 106078.
37. Дмитриев С.В., Татаринов П.С., Семёнов А.С., Бебихов Ю.В., Татаринов В.П., Таров Д.В. Автоматизированная лабораторная установка для исследования эффекта электропластичности. Патент на изобретение RU 2843809 С1, 18.07.2025. Заявка № 2024138887 от 23.12.2024.
38. Дмитриев С.В., Татаринов П.С., Татаринов В.П., Егорова А.А., Семёнова М.Н. Программа для автоматической калибровки, сбора и статистической обработки данных измерений на примере измерения усилия с помощью тензодатчика. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025661426, 06.05.2025. Заявка № 2025618919 от 17.04.2025.
39. Дмитриев С.В., Татаринов П.С., Татаринов В.П., Бебихов Ю.В., Якушев И.А. Программа для автоматического считывания показаний оптической микрометрической

- линейки. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025660695, 25.04.2025. Заявка № 2025618920 от 17.04.2025.
40. Дмитриев С.В., Татаринов П.С., Татаринов В.П., Бебихов Ю.В., Семёнов А.С. 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.
41. Дмитриев С.В., Татаринов П.С., Семёнов А.С., Бебихов Ю.В., Татаринов В.П., Таров Д.В. Автоматизированная лабораторная установка для экспериментального исследования способов электроимпульсной обработки металлов. Евразийский патент на изобретение № 052382, 04.02.2026. Заявка № 202591802 от 09.07.2025.
42. Татаринов П.С., Татаринов В.П., Сугоняко И.С., Моркина А.Ю., Хазимуллин М.В., Таров Д.В., Корзникова Е.А., Якушев И.А., Дмитриев С.В. Автоматизированная лабораторная установка для разработки методов электроимпульсной обработки металлов // Известия Алтайского государственного университета. 2026. № 1 (147). С. 56–62.
43. Morkina A.Y., Tarov D.V., Tatarinov P.S., Bebikhov Yu.V., Korznikova E.A., Dmitriev S.V. Electric Pulse Treatment of Grade 5 Titanium Alloy Plates after Bending to Reduce Springback Effect // *Mechanics of Solids*. 2025. V. 60. Is. 3. P. 2344-2352.
44. Моркина А.Ю., Таров Д.В., Лутфуллин Р.Я., Татаринов П.С., Бебихов Ю.В., Семёнов А.С., Корзникова Е.А., Дмитриев С.В. Обработка импульсным током пластин титанового сплава ВТ6 после гибки для ослабления пружинения // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2025. Т. 22. № 3. С. 324-334.
45. Kukudzhanov 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*. 2026. V. 404. No. 139565.
46. Kukudzhanov K.V., Khalikova G.R., Korznikova E.A., Chentsov A.V., Dmitriev S.V. Healing of Long Fatigue Cracks in Steel Plates by High-Density Current Pulses // *Mechanics of Solids*. 2024. V. 59. Is. 5. P. 3223-3234.
47. Sugonyako I.S., Tarov D.V., Korznikova E.A., Khalikova G.R., Semenov A.S., Kukudzhanov K.V., Dmitriev S.V. Microstructure of 09G2S Steel Near a Fatigue Crack Healed by Pulsed Current // *Preprints.org* (Posted Date: 10 November 2025). <https://doi.org/10.20944/preprints202511.0698.v1>
48. 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*. 2025. (In press: <https://doi.org/10.1007/s10598-025-09650-y>)
49. 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 им. М.К. Аммосова*. 2025. Т. 22. № 4 (102). С. 56-66.
50. Ding S., Zhou M., Liu X., Liu C., Zhang X. Improving the stress corrosion cracking resistance of aged SA508-309L dissimilar metal weld joints by pulsed electric current // *Materials Science and Engineering A*. 2022. V. 849. No. 143506.
51. Gao J.-Y., Liu X.-B., Zhou H.-F., Zhang X.-F. Modification of corrosion resistance of the plain carbon steels by pulsed electric current // *Acta Metallurgica Sinica*. 2018. V. 31. P. 1233-1239.
52. Sun C., Li J., Zhang J., Yan W., Li S.H. Formation and evolution of primary carbides in high-carbon martensitic stainless steel // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2023. V. 30. P. 2000-2009.

### Информация об авторах

*М.Н. Семёнова – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры Фундаментальной и прикладной математики Политехнического института (филиала) в г. Мирном, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова.*

*Ю.В. Бебихов – доктор физ.-мат. наук, доцент, зав. кафедрой Электроэнергетики и автоматизации промышленного производства Политехнического института (филиала) в г. Мирном, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова.*

*В.П. Татаринов – студент, лаборант лаборатории кафедры Электроэнергетики и автоматизации промышленного производства Политехнического института (филиала) в г. Мирном, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова.*

П.С. Татаринов – старший преподаватель кафедры Электроэнергетики и автоматизации промышленного производства Политехнического института (филиала) в г. Мирном, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова.

И.А. Якушев – канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры Фундаментальной и прикладной математики Политехнического института (филиала) в г. Мирном, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова.

Д.У. Абдуллина – аспирант, младший научный сотрудник лаборатории Института физики молекул и кристаллов, Уфимский федеральный исследовательский центр РАН.

А.С. Семёнов – доктор физ.-мат. наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории Института физики молекул и кристаллов, Уфимский федеральный исследовательский центр РАН; зам. председателя Западно-Якутского научного центра Академии наук Республики Саха (Якутия).

С.В. Дмитриев – доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией Института физики молекул и кристаллов, Уфимский федеральный исследовательский центр РАН; профессор Уфимского государственного нефтяного технического университета.

### References

1. Troitsky O.A. (2018) Electroplastic effect in metals. *Ferrous metallurgy*, 9, 65-76.
2. Ponomarev T.S., Belyavin K.E., Minko D.V., Korolkov O.E., Stolyarov V.V. (2020) Electroplastic effect during bending of tungsten wire. In: *Actual problems of strength: proceedings of the international scientific conference*, 296-298.
3. Ponomarev T.S., Belyavin K.E., Minko D.V., Ugurchiev U.Kh., Stolyarov V.V. (2019) Electroplastic effect during stretching of titanium wire. In: *Advanced materials and technologies: collection of materials of the international symposium*, 507-509.
4. Astanin V.V., Khairullina D.R., Pavlova T.E., Kozlov E.D., Mingazhev A.D. (2024) Electroplastic effect in the process of electromagnetic forming. *Materials. Technologies. Design*, 6(3), 5-17.
5. Khairullina D.R., Pavlova T.E., Kozlov E.D., Mingazhev A.D., Maslova L.I. (2024)

Electroplastic effect in electromagnetic stamping technology. *Young Scientist*, 25, 31-35.

6. Chichenev N.A., Gorovaya T.Yu., Karfidov A.O., Chicheneva O.N. (2022) Analysis of electric current supply schemes to rolls during electroplastic rolling of tungsten micro-ribbons. *Non-ferrous metals*, 6, 81-86.

7. Siopis M.S., Kinsey B.L. (2010) Experimental Investigation of Grain and Specimen Size Effects during Electrical-Assisted Forming. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 132(2), 021004.

8. Vovchenko A.I., Demidenko L.Yu., Polovinka V.D. (2013) Influence of current pulse parameters on the development of physical contact during pressure welding of metals. *Electronic processing of materials*, 49, 30-34.

9. Minko D.V. (2020) Analysis of the prospects for applying the electroplastic effect in metal forming processes. *Casting and metallurgy*, 4, 125-130.

10. Pochivalov Yu.I. (2023) Structure and properties of low-alloy steel 10G2FBYu after rolling in relief rolls under electroplasticity conditions. News of higher educational institutions. *Ferrous metallurgy*, 66(6), 659-665.

11. Savenko V.S., Chen Ya. (2024) Improving the performance characteristics of aluminum by electroplastic deformation. *Bulletin of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of Physical and Technical Sciences*, 69(4), 286-296.

12. Ruszkiewicz B.J., Mears L., Grimm T., Roth J.T., Ragai I. (2017) A review of electrically-assisted manufacturing with emphasis on modeling and understanding of the electroplastic effect. *Journal of Manufacturing Science and Engineering. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 139(11), 110801.

13. Troitsky O.A. (1969) Electromechanical effect in metals. *Letters to JETP*, 2(10), 18-22.

14. Izadpanah S., Cao X., An D., Li X., Chen J. (2023) One step forward to electrically assisted forming mechanisms and computer simulation: A review. *Advanced Engineering Materials*, 25(5), 2200425.

15. Korolkov O.E., Misochenko A.A., Stolyarov V.V. (2024) Electroplastic effect in

- titanium under compression. *Factory laboratory. Diagnostics of materials*, 90(12), 65-71.
16. Stolyarov V., Misochenko A. (2023) A pulsed current application to the deformation processing of materials. *Materials*, 16(18), 6270.
17. Kim M.-J., Yoon S., Park S., Jeong H.-J., Park J.-W., Kim K., Jo J., Heo T., Hong S.-T., Cho S.H., Kwon Y.-K., Choi I.-S., Kim M., Han H.N. (2020) Elucidating the origin of electroplasticity in metallic materials. *Applied Materials Today*, 21, 100874.
18. Cai Q., Zhou M., Bagherpour E., Hosseini S., Mendis C., Chang I., Assadi H. (2023) New Insight into Crack-Healing Mechanism via Electropulsing Treatment. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 54, 2960-2974.
19. Xu W., Yang C., Yu H., Jin X., Yang G., Shan D., Guo B. (2021) Combination of eddy current and heat treatment for crack healing and mechanical-property improvement in magnesium alloy tube. *Journal of magnesium and alloys*, 9(5), 1768-1781.
20. Xu W., Yang C., Yu H., Jin X., Guo B., Shan D. (2018) Microcrack healing in non-ferrous metal tubes through eddy current pulse treatment. *Scientific Reports*, 8(1), 6016.
21. Cheng X., Zhang X. (2020) Anti-corrosion Performance Regeneration in Aged Austenitic Stainless Steel by Precipitate Dissolution Below Critical Temperature Using Electropulsing. *ISIJ International*, 60(5), 1022-1029.
22. Kumar R.P., Santhi Srinivas N.C., Pandey R.K., Manna R. (2024) Electropulsing of Low-Density Duplex Steel for Strengthening and Ductilization by Microstructural Refinement. *Journal of Materials Processing Technology*, 329, 118423.
23. Fu X., Xu X., Zhao Y., Chen D., Wu Z., Yan X., Zhou Y., Yu Y. (2024) Retain the austenite via diffusion control under electropulsing to improve the mechanical properties of the AISI 420 stainless steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 29, 1665-1674.
24. Tang H., Du H., Tao K., Chen J., Zhang J. (2019) Effect of electropulsing on edge stretchability and corrosion resistance near the punched edge of a 2024T4 aluminum alloy sheet. *Journal of Materials Processing Technology*, 263, 343-355.
25. Abdullina D.U., Bebikhov Yu.V., Tatarinov P.S., Dmitriev S.V. (2023) Review of the latest achievements in the field of electroplastic metal forming. *Basic Problems of Material Science*, 20(4), 469-483.
26. Kim D.Ch., Semenov A.S., Bebikhov Yu.V., Efimov V.A., Spiridonov V.M., Tatarinov P.S. (2020) Development and testing of a setup for studying a laboratory analogue of ball lightning. *Bulletin of the Ammosov North-Eastern Federal University*, 6(80), 34-47.
27. Kim, D.C., Semenov, A.S., Efimov, V.A., Bebikhov, Y.V. (2020) Installation for Studying the Laboratory Analog of Ball Lightning. In: *2020 International Multi Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (Fareastcon 2020)*, 9271597.
28. Kim D.Ch., Semenov A.S., Bebikhov Yu.V., Tatarinov P.S. (2022) Application of a pulsed thyatron for switching the Gatchina discharge. *Bulletin of the Ammosov North-Eastern Federal University*, 3(89), 27-38.
29. Kim, D.C., Semenov, A.S., Tatarinov, P.S., Bebikhov, Y.V. (2022) Upgrade of High-Voltage Section of Laboratory Unit for Ball Plasmoid Generation. In: *Proceedings 2022 4th International Conference on Control Systems Mathematical Modeling Automation and Energy Efficiency (Summa 2022)*, 755-759.
30. Tatarinov V.P., Tatarinov P.S., Bebikhov Yu.V., Semenov A.S., Dmitriev S.V. (2024) Development of a method for measuring high-magnitude pulse currents. *Bulletin of the Ammosov North-Eastern Federal University*, 21(1), 81-88.
31. Tatarinov V.P., Bebikhov Yu.V., Tatarinov P.S., Zolotina K.V., Gulyaev G.S. (2024) Experimental study of the electroplastic effect during the passage of current pulses. In: *Science and innovative developments - to the North: collection of materials of the III International scientific and practical conference*, 201-205.
32. Dmitriev S.V., Morkina A.Y., Tarov D.V., Khalikova G.R., Abdullina D.U., Tatarinov P.S., Tatarinov V.P., Semenov A.S., Naimark O.B., Khokhlov A.V., Stolyarov V.V. (2024) 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.

33. Morkina A.Yu., Tarov D.V., Naumova D.M., Tatarinov P.S., Tatarinov V.P., Semenov A.S., Yakushev I.A., Dmitriev S.V. (2024) Influence of repeating high-density current pulses on plastic deformation of copper wires. *Bulletin of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 3, 15-23.

34. Morkina A.Y., Tarov D.V., Khalikova G.R., Semenov A.S., Tatarinov P.S., Yakushev I.A., Dmitriev S.V. (2024) Comparison of the effect of electroplasticity in copper and aluminum. *Facta Universitatis. Series: Mechanical Engineering*, 22(4), 615-632.

35. Morkina A.Y., Tarov D.V., Yakushev I.A., Tatarinov P.S., Korznikova E.A., Dmitriev S.V. (2024) Effect of electroplasticity studied for aluminum wires under tension. *Procedia Structural Integrity*, 65, 158-162.

36. Morkina A.Y., Tarov D.V., Korznikova E.A., Khazimullin M.V., Semenova M.N., Tatarinov P.S., Yakushev I.A., Dmitriev S.V. (2026) Effect of current pulse parameters on the electroplasticity of tensioned copper wires. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 118, 106078.

37. Dmitriev S.V., Tatarinov P.S., Semenov A.S., Bebikhov Yu.V., Tatarinov V.P., Tarov D.V. (2025) Automated laboratory setup for studying the electroplasticity effect. Patent RU 2843809.

38. Dmitriev S.V., Tatarinov P.S., Tatarinov V.P., Egorova A.A., Semenova M.N. (2025) Software for automatic calibration, collection, and statistical processing of measurement data using a strain gauge force measurement example. Computer program registration certificate RU 2025661426.

39. Dmitriev S.V., Tatarinov P.S., Tatarinov V.P., Bebikhov Yu.V., Yakushev I.A. (2025) Software for Automatic Reading of Optical Micrometer Ruler Readings. Computer Program Registration Certificate RU 2025660695.

40. Dmitriev S.V., Tatarinov P.S., Tatarinov V.P., Bebikhov Yu.V., Semenov A.S. (2025) Software for Automatic Normalization of Current Pulse Based on Capacitor Battery Charge.

Computer Program Registration Certificate RU 2025660558.

41. Dmitriev S.V., Tatarinov P.S., Semenov A.S., Bebikhov Yu.V., Tatarinov V.P., Tarov D.V. (2026) Automated Laboratory Setup for Experimental Study of Electric Pulse Machining Methods of Metals. Eurasian Patent No. 052382.

42. Tatarinov P.S., Tatarinov V.P., Sugonyako I.S., Morkina A.Y., Khazimullin M.V., Tarov D.V., Korznikova E.A., Yakushev I.A., Dmitriev S.V. (2026) Automated Laboratory Setup for the Development of Methods for Electrical Discharge Machining of Metals. *Izvestiya of Altai State University*, 1(147), 56-62.

43. Morkina A.Y., Tarov D.V., Tatarinov P.S., Bebikhov Yu.V., Korznikova E.A., Dmitriev S.V. (2025) Electric Pulse Treatment of Grade 5 Titanium Alloy Plates after Bending to Reduce Springback Effect. *Mechanics of Solids*, 60(3), 2344-2352.

44. Morkina A.Yu., Tarov D.V., Lutfullin R.Ya., Tatarinov P.S., Bebikhov Yu.V., Semenov A.S., Korznikova E.A., Dmitriev S.V. (2025) Pulsed current treatment of VT6 titanium alloy plates after bending to weaken springback. *Basic Problems of Material Science*, 22(3), 324-334.

45. Kukudzhyanov K.V., Korznikova E.A., Chentsov A.V., Dmitriev S.V. (2026) A novel approach to determining the parameters of electric pulse healing of fatigue cracks. *Materials Letters*, 404, 139565.

46. Kukudzhyanov K.V., Khalikova G.R., Korznikova E.A., Chentsov A.V., Dmitriev S.V. (2024) Healing of Long Fatigue Cracks in Steel Plates by High-Density Current Pulses. *Mechanics of Solids*, 59(5), 3223-3234.

47. Sugonyako I.S., Tarov D.V., Korznikova E.A., Khalikova G.R., Semenov A.S., Kukudzhyanov K.V., Dmitriev S.V. (2025) Microstructure of 09G2S Steel Near a Fatigue Crack Healed by Pulsed Current. Preprints.org. <https://doi.org/10.20944/preprints202511.0698.v1>

48. Semenov A.S., Semenova M.N., Bebikhov Yu.V., Yakushev I.A. (2025) Mathematical and simulation modeling in the study of the electroplastic effect in metals. *Computational Mathematics and Modeling* (In press: <https://doi.org/10.1007/s10598-025-09650-y>).

49. Semenov A.S., Tatarinov V.P., Tatarinov P.S., Yakushev I.A. (2025) Computer simulation of the process of discharge of a capacitor bank through a sample in the form of copper wire. *Bulletin of the Ammosov North-Eastern Federal University*, 22(4), 56-66.

50. Ding S., Zhou M., Liu X., Liu C., Zhang X. (2022) Improving the stress corrosion cracking resistance of aged SA508-309L dissimilar metal weld joints by pulsed electric current. *Materials Science and Engineering A*, 849, 143506.

51. Gao J.-Y., Liu X.-B., Zhou H.-F., Zhang X.-F. (2018) Modification of corrosion resistance of the plain carbon steels by pulsed electric current. *Acta Metallurgica Sinica*, 31, 1233-1239.

52. Sun C., Li J., Zhang J., Yan W., Li S.H. (2023) Formation and evolution of primary carbides in high-carbon martensitic stainless steel. *Journal of Iron and Steel Research International*, 30, 2000-2009.

#### **Information about the authors**

*M.N. Semenova – Cand. of Phys. and Math. Sciences, Associate Professor in the Department of Fundamental and Applied Mathematics at the Polytechnic Institute (branch) in Mirny, Ammosov North-Eastern Federal University.*

*Yu.V. Bebikhov – Doctor of Phys. and Math. Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Electric Power Engineering and Industrial Automation at the Polytechnic Institute*

*(branch) in Mirny, Ammosov North-Eastern Federal University.*

*V.P. Tatarinov – Student, Laboratory Assistant in the Department of Electric Power Engineering and Industrial Automation at the Polytechnic Institute (branch) in Mirny, Ammosov North-Eastern Federal University.*

*P.S. Tatarinov – Senior Lecturer in the Department of Electric Power Engineering and Industrial Automation at the Polytechnic Institute (branch) in Mirny, Ammosov North-Eastern Federal University.*

*I.A. Yakushev – Cand. of Phys. and Math. Sciences, Associate Professor in the Department of Fundamental and Applied Mathematics at the Polytechnic Institute (branch) in Mirny, Ammosov North-Eastern Federal University.*

*D.U. Abdullina – Graduate Student and Junior Researcher in the Laboratory of the Institute of Molecule and Crystal Physic, Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences.*

*A.S. Semenov – Doctor of Phys. and Math. Sciences, Associate Professor, Senior Researcher in the Laboratory of the Institute of Molecule and Crystal Physic, Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; Deputy Chairman of the West Yakut Scientific Center of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia).*

*S.V. Dmitriev – Doct. of Phys. and Math. Sciences, Professor, Head of Laboratory at the Institute of Molecule and Crystal Physic, Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; Professor at the Ufa State Petroleum Technological University.*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02.03.2026; одобрена после рецензирования 10.03.2026; принята к публикации 11.03.2026.

The article was received by the editorial board on 02 Mar. 2026; approved after reviewing 10 Mar. 2026; accepted for publication 11 Mar. 2026.