

УДК 538.9

<https://doi.org/10.25587/2222-5404-2025-22-4-56-66>

Оригинальная научная статья



Компьютерное моделирование процесса разряда конденсаторной батареи через образец в виде медной проволоки

А. С. Семёнов^{1,2}, В. П. Татаринов³, П. С. Татаринов³, И. А. Якушев³

¹Институт физики молекул и кристаллов Уфимского федерального исследовательского центра РАН, г. Уфа, Российская Федерация

²Западно-Якутский научный центр Академии наук Республики Саха (Якутия), г. Мирный, Российская Федерация

³Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, г. Мирный, Российская Федерация
sash-alex@yandex.ru

Аннотация

В работе проведено комплексное изучение путём численного (математического) и имитационного (компьютерного) моделирования процесса разряда конденсаторной батареи через образец в виде медной проволоки в установке для изучения эффекта электропластичности. Электропластический эффект – это явление, при котором происходит снижение предела текучести под воздействием электрического тока. Представлена запатентованная установка для изучения эффекта электропластичности. Получены первые результаты, выполненные на данной установке, которые относятся к сравнению степени влияния эффекта электропластичности на образцы из меди и алюминия. Из-за более высокой удельной электропроводности и меньшего скин-эффекта медных образцов эффект электропластической деформации в них проявлялся более наглядно, в результате чего было принято решение начать более детальные исследования именно с образцами в виде медной проволоки. Приведены дифференциальные уравнения, описывающие токовые кривые, получающиеся при разряде заряженной батареи конденсаторов через образец в виде медной проволоки без учета изменений внутренней структуры образцов. При помощи метода наименьших квадратов и дискретного преобразования Фурье были оценены параметры индуктивности и сопротивления всей системы, соответственно. Численно, с погрешностью не более 2%, определена общая емкость рабочей батареи конденсаторов. Разработаны две идентичные имитационные модели для вычисленных параметров в пакете программ MatLab и среде SimInTech, состоящие из последовательно соединенных RLC элементов, измерительных блоков (амперметр и вольтметр) и осциллографов. Произведено сравнение результатов моделирования с полученной токовой кривой в ходе натурных испытаний при тех же начальных условиях. Сделаны выводы о практически полном предсказании обеими моделями таких параметров, как пиковое значение тока и длина импульса в пределах погрешности измерительного оборудования.

Ключевые слова: электропластический эффект, конденсаторная батарея, разряд, медная проволока, импульсный ток, моделирование, токовые кривые, погрешность, MatLab, SimInTech

Финансирование. Исследование не имело финансовой поддержки

Для цитирования: 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 СВФУ*. 2025, Т. 22, № 4. С. 56–66. DOI: 10.25587/2222-5404-2025-22-4-56-66

Original article

Computer simulation of the discharge process of a capacitor bank through a sample in the form of a copper wire

Aleksandr S. Semenov^{1,2}, Vladimir P. Tatarinov¹, Pavel S. Tatarinov³, Ilya A. Yakushev³

¹Institute of Molecule and Crystal Physics of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russian Federation

²West-Yakut Scientific Center of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Mirny, Russian Federation

³Polytechnic Institute (branch) M.K. Ammosov North-Eastern Federal University,
Mirny, Russian Federation
sash-alex@yandex.ru

Abstract

A comprehensive study was carried out by numerical (mathematical) and simulation (computer) modeling of the discharge process of a capacitor bank through a sample in the form of a copper wire in an installation for studying the effect of electroplasticity. The electroplastic effect is a phenomenon in which the yield strength decreases under the influence of electric current. A patented installation for studying the effect of electroplasticity is presented. The first results performed at this installation have been obtained, which relate to comparing the degree of influence of the electroplasticity effect on copper and aluminum samples. Due to the higher electrical conductivity and lower skin effect of the copper samples, the effect of electroplastic deformation in them was more evident, as a result of which it was decided to begin more detailed studies with samples in the form of copper wire. Differential equations describing the current curves obtained when a charged battery of capacitors is discharged through a sample in the form of a copper wire without taking into account changes in the internal structure of the samples are given. Using the least squares method and the discrete Fourier transform, the inductance and resistance parameters of the entire system were estimated, respectively. The total capacity of the capacitor bank is determined numerically, with an error of no more than 2%. Two identical simulation models have been developed for the calculated parameters in the MatLab software package and the SimInTech environment, consisting of RLC elements connected in series, measuring units (ammeter and voltmeter) and oscilloscopes. The simulation results are compared with the current curve obtained during field tests under the same initial conditions. Conclusions are drawn about the almost complete prediction by both models of parameters such as the peak current value and pulse length within the error limits of the measuring equipment.

Keywords: electroplastic effect, capacitor bank, discharge, copper wire, pulse current, simulation, current curves, error, MatLab, SimInTech

Funding. No funding was received for writing this manuscript

For citation: 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 NEFU*. 2025, Vol. 22, No. 4. Pp. 56–66. DOI: 10.25587/2222-5404-2025-22-4-56-66

Введение

Электропластический эффект (ЭЭ) – явление, при котором происходит снижение предела текучести под воздействием электрического тока. В 1969 г. Троицкий [1] обнаружил, что импульсы электрического тока уменьшают усилия, необходимые

для инициирования деформации в металлах. На графике (рис. 1) в виде первичной диаграммы растяжения показаны первые результаты экспериментальных исследований Троицкого. Величина импульса тока варьировалась от 600 до 1800 А, длина (протяженность) импульса составляла примерно 0,1 мс. Напряжение изменилось ступенчато от 50 до 150 В с интервалом 25 В.

На графике видно, что после упругой области наблюдаются скачки деформации, возрастающие по своей величине с ростом напряжения на клеммах разрядного устройства. Величина таких деформационных скачков свидетельствует о значительном приращении пластической деформации в момент прохождения импульса тока.

В настоящее время ЭЭ является одним из наиболее эффективных способов упрощения производственных процессов в обработке металлов [2, 3], в улучшении их свойств [4, 5], а также при заливании трещин [6–9].

Работа по изучению ЭЭ в Политехническом институте (филиале) СВФУ им. М.К. Аммосова в г. Мирном (далее МПТИ (ф) СВФУ) началась с обзора последних достижений в области электропластической обработки металлов давлением [10], теоретического объяснения эффекта электропластичности [11] и его молекулярно-динамического моделирования [12].

В дальнейшем для проведения экспериментальных исследований появилась необходимость измерения импульсных токов большой величины, не только по амплитуде, но и по форме импульса, т. е. требовалась информация об эволюции моментального значения тока в импульсе. В работе [13] была описана разработка способа измерения импульсных токов большой величины.

В 2024 г. на кафедре электроэнергетики и автоматизации промышленного производства МПТИ (ф) СВФУ на базе лабораторий физики и теоретических основ электротехники была собрана первая установка для изучения ЭЭ (рис. 2).

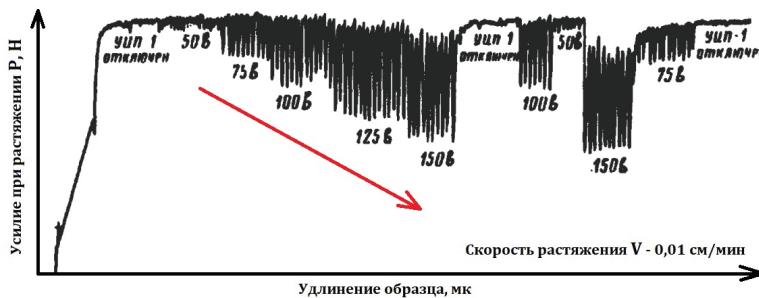


Рис. 1. Первичная диаграмма растяжения монокристалла цинка при импульсной обработке электрическим током [1]

Fig. 1. Primary stretching diagram of a zinc single crystal during pulsed electric current treatment [1]

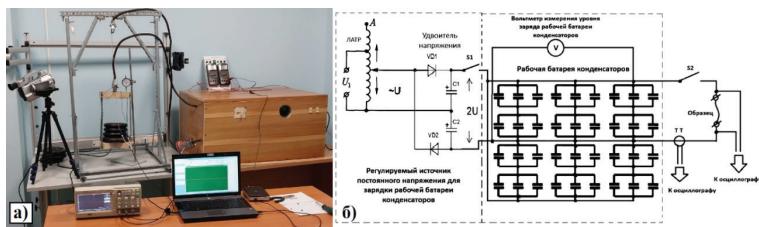


Рис. 2. Экспериментальная установка для изучения эффекта электропластичности (а) и её принципиальная электрическая схема (б) [13]

Fig. 2. Experimental installation for studying the effect of electroplasticity (a) and its basic electrical circuit (b) [13]

В 2025 г. был получен патент на изобретение «Автоматизированная лабораторная установка для исследования эффекта электропластичности» [14]. Схема механической части установки для растяжения образца и схема расположения контрольно-измерительных датчиков показаны на рис. 2. Пронумерованные элементы и принцип работы подробно описаны в вышеуказанном патенте.

Первые опыты, проведенные на данной установке, относились к сравнению степени влияния эффекта электропластичности на образцы из меди и алюминия [15]. Из-за более высокой удельной электропроводности и меньшего скин-эффекта медных образцов эффект электропластической деформации в них проявлялся более наглядно, в результате чего было принято решение начать более детальные исследования именно с образцами в виде медной проволоки [16]. На графиках рис. 4 показаны увеличение растягивающего напряжения проволоки под действием электрического импульса и соответствующее повышение температуры проволоки в зависимости от напряжения конденсаторной батареи, разряженной на проволоке. Причём для исследования использовались два вида медной проволоки: обычная и отожжённая.

Результаты, представленные на рис. 4, получены для обычных (черные кривые) и отожженных (красные кривые) медных проволок. Увеличение напряжения (рис. 4а), вызванное электрическим импульсом, и соответствующее повышение

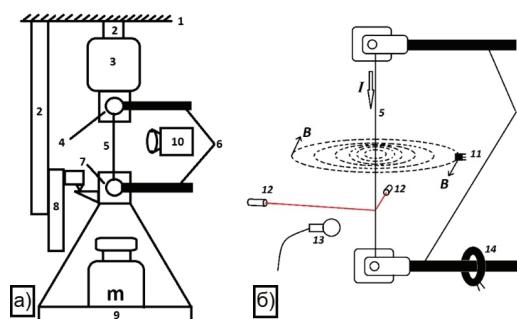


Рис. 3. Схемы автоматизированной лабораторной установки для исследования эффекта электропластичности: а) механическая часть, б) расположение датчиков [14]

Fig. 3. Diagrams of an automated laboratory installation for studying the effect of electroplasticity:
a) mechanical part, b) location of sensors [14]

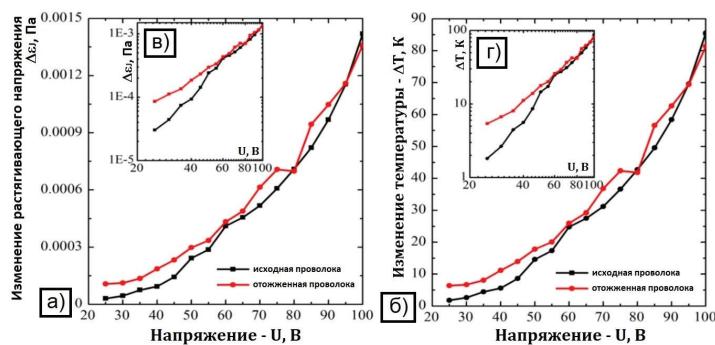


Рис. 4. Графики увеличения растягивающего напряжения проволоки под действием электрического импульса (а) и соответствующее повышение температуры проволоки в зависимости от напряжения конденсаторной батареи (б) [16]

Fig. 4. Graphs of an increase in the tensile voltage of the wire under the action of an electric pulse (a) and a corresponding increase in the temperature of the wire depending on the voltage of the capacitor bank (b) [16]

температуры (рис. 4б) показаны как функции напряжения на конденсаторе. На вставках (рис. 4 в, г) показаны кривые в логарифмической шкале, отображающие зависимости $\Delta\varepsilon_j$ и ΔT от напряжения.

Таким образом, как уже отмечалось ранее, появляется необходимость в постоянной нормировке импульса тока по величине заряда конденсаторной батареи для обеспечения точности дальнейших аналитических вычислений параметров процесса электроимпульсной обработки металлов.

Материалы и методы

Для описания токовых кривых, получающихся при разряде заряженной батареи конденсаторов через образец в виде медной проволоки без учета изменений внутренней структуры образцов, можно записать дифференциальное уравнение:

$$L \cdot \frac{d^2 q}{dt^2} + R \cdot \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = 0, \quad (1)$$

где необходимо знать значения L , R и C (индуктивность, сопротивление и емкость соответственно), чтобы найти функцию $q(t)$ при известном значении $q(0)$.

В самом начале токовой кривой сопротивлением всей системы можно пренебречь. Большая часть напряжения будет вызвана большой производной тока. Считая, что:

$$L \cdot \frac{dI}{dt} = U, \quad (2)$$

индуктивность всей системы была оценена в $L=(4,60\pm0,03)\cdot10^{-6}$ (Гн) при помощи метода наименьших квадратов с коэффициентом корреляции 0,99994 (рис. 5а).

Оценив индуцированное всей системой напряжение на всем протяжении импульса, благодаря величине L , получили зависимость сопротивления от времени:

$$R(t) = \frac{U(t) - L \cdot \frac{dI(t)}{dt}}{I(t)}. \quad (3)$$

Произведя численное дифференцирование тока и фильтрацию его паразитных частотных составляющих при помощи дискретного преобразования Фурье, получили численное представление функции $R(t)$ (рис. 5б). Численное дифференцирование производилось при помощи свойства Фурье-преобразования, общий вид которого выражается формулой:

$$\Phi \left[\frac{d}{dt} f(t) \right] = i\omega \cdot \Phi [f(t)], \quad (4)$$

где f – функция вещественной переменной, t – время, ω – частота.

Таким образом, значение сопротивления всей системы (куда входит сопротивление образца подводящих проводов и контактов) было определено как $R=0,01181\pm0,00007$ (Ом). Пик в районе $t=0,6$ (мс) является следствием изменения внутренней структуры образца и на данный момент не является предметом нашего рассмотрения.

Поскольку в электрической части установки (в рабочей конденсаторной батарее) использованы 36 однотипных электролитических конденсаторов с емкостью каждого 3300 мкФ и рабочим напряжением до 400 В, то общая емкость рабочей батареи конденсаторов при последовательно-параллельном соединении и рабочем напряжении до 800 В составит 29 700 мкФ. Этот параметр с погрешностью до 2% был оценён в работе [13].

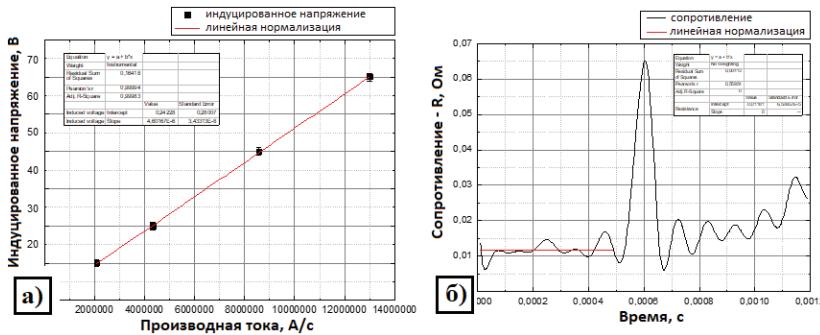


Рис. 5. Графические зависимости индуцированного напряжения от производной тока по времени (а) и сопротивления от времени (б)

Fig. 5. Graphical dependences of the induced voltage on the time derivative of current (a) and resistance on time (b)

Результаты и обсуждение

По итогам всех измерений, вычислений и математического моделирования для заданных параметров, представленных в табл., были созданы имитационные модели в пакете программ MatLab и среде SimInTech. Для наглядности и сравнения были выбраны зарубежная и отечественная программы. Использование возможностей MatLab без локальной установки обеспечивается открытой веб-платформой MatLab Online, доступ к которой можно получить, зарегистрировавшись на сайте mathworks.com. Доступ к SimInTech обеспечивается по учебной лицензии МПТИ (ф) СВФУ, действующей до 31.07.2026 г.

Модели являются весьма простыми и состоят из последовательно соединенных RLC элементов, измерительных блоков (амперметр и вольтметр) и осциллографов.

Таблица

Параметры для имитационного моделирования

Table

Input parameters for simulation

Параметр / Parameter	Индуктивность / Inductance	Сопротивление / Resistance	Емкость / Electric Capacity	Начальное напряжение / Initial Voltage
Обозначение (единица измерения) / Measurement	L (Гн) / L (H)	R (Ом) / R (Ohm)	C (Ф) / C (F)	U (В) / U (V)
Величина / Value	$4,6 \cdot 10^{-6}$	$11,8 \cdot 10^{-3}$	$29,7 \cdot 10^{-3}$	10

MatLab (Matrix Laboratory) – это пакет программ, предназначенный для аналитического и численного решения различных математических задач, а также для моделирования электротехнических и электромеханических систем [17]. В состав пакета MatLab входит ядро компьютерной алгебры Maple и библиотека блоков Simulink, а также десятки других пакетов расширений, что позволяет моделировать сложные технические системы.

SimInTech (Simulation In Technic) – это отечественная среда динамического моделирования технических систем, предназначенная для расчётов проверки работы систем управления сложными техническими объектами [18]. Является собственной разработкой ООО «ЗВ Сервис». Номер в едином реестре российских ПЭВМ: 2379.

Блок-схема модели и результаты моделирования графика кривой тока при начальных условиях в пакете программ MatLab показаны на рис. 6.

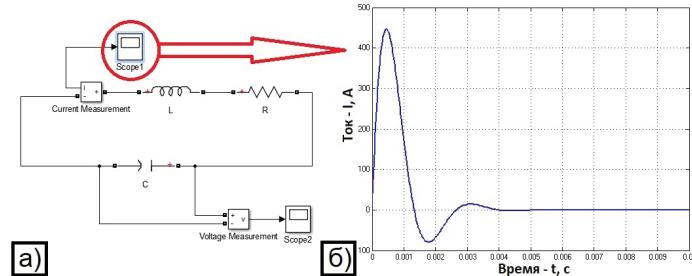


Рис. 6. Блок-схема модели (а) и результаты моделирования (б) в пакете программ MatLab
Fig. 6. The block diagram of the model (a) and the simulation results (b) in the MatLab software package

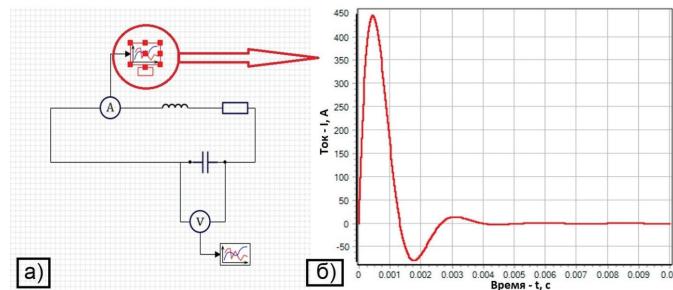


Рис. 7. Блок-схема модели (а) и результаты моделирования (б) в среде SimInTech
Fig. 7. The block diagram of the model (a) and the simulation results (b) in the SimInTech environment

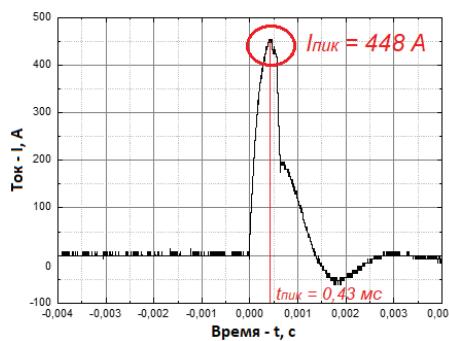


Рис. 8. Токовая кривая, полученная в ходе натурных испытаний, численным методом
Fig. 8. The current curve obtained during field tests using the numerical method

Аналогичная блок-схема модели и результаты моделирования графика кривой тока при тех же начальных условиях в среде SimInTech показаны на рис. 7.

Обе модели показали идентичные результаты. Пиковое значение тока в обоих случаях равно 448 А, а время достижения этого значения составляет 0,43 мс.

Если сравнивать результаты моделирования с полученной токовой кривой в ходе натурных испытаний при таких же начальных условиях (рис. 8), то можно сделать вывод, что созданные имитационные модели полностью предсказывают такие параметры, как пиковое значение тока и длина импульса в пределах погрешности измерительного оборудования.

В результате проведенных исследований была разработана и запатентована программа для ЭВМ «Программа для автоматической нормировки импульса тока по величине заряда батареи конденсаторов» [19]. Однако требуется дальнейшее изучение влияния изменения сопротивления образца в результате изменения его внутренней структуры на токовую кривую для получения более точной модели.

Заключение

Проведённое моделирование и полученные результаты показывают важную роль комплексного изучения процесса разряда конденсаторной батареи через образец в виде медной проволоки в установке для изучения эффекта электропластичности, которая заключается в обеспечении точности дальнейших аналитических вычислений параметров процесса электроимпульсной обработки металлов.

Численное моделирование позволило определить необходимые исходные данные, а полученные имитационные модели с высокой точностью позволили предсказать такие параметры, как пиковое значение тока и длина импульса в пределах погрешности измерительного оборудования.

Также стоит отметить, что отечественная среда моделирования SimInTech не уступает пакету программ MatLab по точности и скорости моделирования, а в каких-то моментах, например, по удобству интерфейса и наличию русскоязычной версии, имеет явные преимущества.

Все эти результаты вылились в разработку программы для ЭВМ «Программа для автоматической нормировки импульса тока по величине заряда батареи конденсаторов», которая может быть использована студентами, аспирантами и научными сотрудниками, занимающимися экспериментальными исследованиями в области физики конденсированного состояния, в частности в исследовании электропластичности.

Л и т е р а т у р а

1. Troitskii OA. Electromechanical effect in metals. *JETP Letters*. 1969;1:18-22.
2. Conrad H. Electroplasticity in metals and ceramics. *Materials Science and Engineering A*. 2000;287(2):276-287. DOI: 10.1016/s0921-5093(00)00786-3.
3. Lu Y, Chen G, Zhang B. et al. Application of electroplastic effect in mechanical processing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024;135:25-48. DOI: 10.1007/s00170-024-14574-9.
4. Conrad H, Sprecher AF, Cao WD. et al. Electroplasticity - the effect of electricity on the mechanical properties of metals. *JOM*. 1990;42:28-33. DOI: 10.1007/BF03221075.
5. Cao WD, Conrad H. On the effect of persistent slip band (PSB) parameters on fatigue life. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 1992;15(6):573-583. DOI: 10.1111/j.1460-2695.1992.tb01296.x.
6. Zhou Y, Zeng Y, He G, Zhou B. The healing of quenched crack in 1045 steel under Electropulsing. *Journal of Materials Research*. 2001;16:17-19. DOI: 10.1557/JMR.2001.0005.
7. Zhou Y, Guo J, Gao M, He G. Crack healing in a steel by using electropulsing technique. *Materials Letters*. 2004;58(11):1732-1736. DOI: 10.1016/j.matlet.2003.10.049.
8. Hosoi A, Nagahama T, Ju Y. Fatigue crack healing by a controlled high density electric current field. *Materials Science and Engineering A*. 2012;533:38-42. DOI: 10.1016/j.msea.2011.11.024.
9. Брызгалов В.А., Моркина А.Ю., Абдуллина Д.У. и др. Обзор исследований по залечиванию макротрещин в металлах под действием импульсного тока высокой плотности. *Materials. Technologies. Design*. 2024;6(2):38-58. DOI: 10.54708/26587572_2024_621738.
10. 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;20(4):469-483. DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.04.006.

11. Бощкова К.В., Бебихов Ю.В., Кугушева Н.Н., Татаринов П.С. Электропластическая деформация: теоретические объяснения эффекта. В кн.: *Молодежь и научно-технический прогресс в современном мире: Сборник материалов XII-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. Москва: Спутник+; 2023:68-70.
12. Morkina AY, Tarov DV, Yakushev IA, et al. Effect of electroplasticity studied for aluminum wires under tension. *Procedia Structural Integrity*. 2024;65:158-162. DOI: 10.1016/j.prostr.2024.11.025.
13. 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*. 2024;21(1):81-88. DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-1-81-88.
14. Дмитриев С.В., Татаринов П.С., Семёнов А.С. и др. Патент на изобретение RU2843809: *Автоматизированная лабораторная установка для исследования эффекта электропластичности*. 2025.
15. Morkina AY, Tarov DV, Khalikova GR, et al. Comparison of the effect of electroplasticity in copper and aluminum. *Facta Universitatis. Series: Mechanical Engineering*. 2024;22(4):615-632. DOI: 10.22190/fume240920049m.
16. Dmitriev SV, Morkina AY, Tarov DV, 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*. 2024;1(1):27-43. DOI: 10.31181/smeor1120243.
17. Семёнов А.С. Моделирование режимов работы асинхронного двигателя в пакете программ MatLab. *Вестник Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова*. 2014;11(1):51-59.
18. Shchemeleva YB, Sokolov AA, Labazanova SH. Development of hardware and a system for analyzing energy parameters based on simulation in SimInTech. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022;2176:012082. DOI: 10.1088/1742-6596/2176/1/012082.
19. Дмитриев С.В., Татаринов П.С., Татаринов В.П. и др. Программа для ЭВМ 2025660558: *Программа для автоматической нормировки импульса тока по величине заряда батареи конденсаторов*. 2025.

R e f e r e n c e s

1. Troitskii OA. Electromechanical effect in metals. *JETP Letters*. 1969;1:18-22. (in English)
2. Conrad H. Electroplasticity in metals and ceramics. *Materials Science and Engineering A*. 2000;287(2):276-287. (in English) DOI: 10.1016/s0921-5093(00)00786-3.
3. Lu Y, Chen G, Zhang B. et al. Application of electroplastic effect in mechanical processing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024;135:25-48. (in English) DOI: 10.1007/s00170-024-14574-9.
4. Conrad H, Sprecher AF, Cao WD. et al. Electroplasticity - the effect of electricity on the mechanical properties of metals. *JOM*. 1990;42:28-33. (in English) DOI: 10.1007/BF03221075.
5. Cao WD, Conrad H. On the effect of persistent slip band (PSB) parameters on fatigue life. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 1992;15(6):573-583. (in English) DOI: 10.1111/j.1460-2695.1992.tb01296.x.
6. Zhou Y, Zeng Y, He G, Zhou B. The healing of quenched crack in 1045 steel under Electropulsing. *Journal of Materials Research*. 2001;16:17-19. (in English) DOI: 10.1557/JMR.2001.0005.
7. Zhou Y, Guo J, Gao M, He G. Crack healing in a steel by using electropulsing technique. *Materials Letters*. 2004;58(11):1732-1736. (in English) DOI: 10.1016/j.matlet.2003.10.049.
8. Hosoi A, Nagahama T, Ju Y. Fatigue crack healing by a controlled high density electric current field. *Materials Science and Engineering A*. 2012;533:38-42. (in English) DOI: 10.1016/j.msea.2011.11.024.
9. Bryzgalov VA, Morkina AY, Abdullina DU. et al. Review of research on macro-crack healing in metals under high-density pulsed current. *Materials. Technologies. Design*. 2024;6(2):38-58. (in Russian) DOI: 10.54708/26587572_2024_621738.

10. Abdullina DU, Bebikhov YuV, Tatarinov PS, Dmitriev SV. Review of recent advances in electroplastic metal forming. *Fundamental'nye problemy sovremennoego materialovedeniya = Basic Problems of Material Science (BPMS)*. 2023;20(4):469-483. (in Russian) DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.04.006.
11. Boshkova KV, Bebikhov YuV, Kugusheva NN, et al. Electroplastic deformation: theoretical explanations of the effect. In: *Youth and Scientific-Technical Progress in the Modern World: Proceedings of the XII All-Russian Research-to-Practice Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists*. Moscow: Publishing House “Sputnik+”, 2023:68-70 (in Russian).
12. Morkina AY, Tarov DV, Yakushev IA, et al. Effect of electroplasticity studied for aluminum wires under tension. *Procedia Structural Integrity*. 2024;65:158-162. (in English) DOI: 10.1016/j.prostr.2024.11.025.
13. Tatarinov VP, Tatarinov PS, Bebikhov YuV. et al. Development of a method for measuring high-magnitude pulsed currents. *Vestnik of North-Eastern Federal University*. 2024;21(1):81-88. (in Russian) DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-1-81-88.
14. Dmitriev SV, Tatarinov PS, Semenov AS. et al. Patent for invention RU2843809: Automated laboratory setup for studying the electroplasticity effect. 2025. (in Russian)
15. Morkina AY, Tarov DV, Khalikova GR, et al. Comparison of the effect of electroplasticity in copper and aluminum. *Facta Universitatis. Series: Mechanical Engineering*. 2024;22(4):615-632. (in English) DOI: 10.22190/fume240920049m.
16. Dmitriev SV, Morkina AY, Tarov DV, 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*. 2024;1(1):27-43. (in English) DOI: 10.31181/smeor1120243.
17. Semenov AS. Modeling of induction motor operating modes in MatLab software package. *Vestnik of North-Eastern Federal University*. 2014;11(1):51-59. (in Russian)
18. Shchemeleva YB, Sokolov AA, Labazanova SH. Development of hardware and a system for analyzing energy parameters based on simulation in SimInTech. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022;2176:012082. (in English) DOI: 10.1088/1742-6596/2176/1/012082.
19. Dmitriev SV, Tatarinov PS, Tatarinov VP, et al. Computer Program 2025660558: *Program for automatic normalization of current pulse by capacitor bank charge value*. 2025 (in Russian).

Сведения об авторах

СЕМЁНОВ Александр Сергеевич – д. ф.-м. н., доцент, с. н. с. лаборатории «Физика твердого тела», ФГБУН Институт физики молекул и кристаллов Уфимского федерального исследовательского центра РАН, г. Уфа, Российская Федерация; зам. председателя Западно-Якутского научного центра Академии наук Республики Саха (Якутия), г. Мирный, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-9940-3915>, ResearcherID: E-1995-2015, Scopus ID: 56251872700, SPIN: 4335-0834, sash-alex@yandex.ru

ТАТАРИНОВ Владимир Павлович – студент 4 курса специальности «Прикладная математика и информатика», Политехнический институт (филиал) ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова» в г. Мирном, г. Мирный, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0002-0074-677X>, SPIN: 9620-4290, vovatatarinov@bk.ru

ТАТАРИНОВ Павел Семенович – ст. преп. каф. электроэнергетики и автоматизации промышленного производства, Политехнический институт (филиал) ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова» в г. Мирном, г. Мирный, Российской Федерации, <https://orcid.org/0000-0001-7430-8591>, Scopus ID: 55964196100, SPIN: 8950-4440, paveltatarinov@mail.ru

ЯКУШЕВ Илья Анатольевич – к. ф.-м. н., доцент кафедры фундаментальной и прикладной математики, Политехнический институт (филиал) ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова» в г. Мирном, г. Мирный, Российской Федерации, <https://orcid.org/0000-0003-2539-7334>, ResearcherID: AAO-4495-2020, Scopus ID: 55220843700, SPIN: 7671-3618, yakushevilya@mail.ru

About the authors

Aleksandr S. SEMENOV – Doct. of Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Senior Researcher at the Laboratory of Solid State Physics, Institute of Molecule and Crystal Physics, Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russian Federation; Deputy Chairman of the West-Yakut Scientific Center, Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Mirny, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-9940-3915>, ResearcherID: E-1995-2015, Scopus ID: 56251872700, SPIN: 4335-0834, sash-alex@yandex.ru

Vladimir P. TATARINOV – 4th year student in Applied Mathematics and Computer Science, Polytechnic Institute (branch) M.K. Ammosov North-Eastern Federal University in Mirny, Mirny, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0002-0074-677X>, SPIN: 9620-4290, vovatatarinov@bk.ru

Pavel S. TATARINOV – Senior Lecturer of the Department of Electric Power Engineering and Industrial Automation, Polytechnic Institute (branch) M.K. Ammosov North-Eastern Federal University in Mirny, Mirny, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-7430-8591>, Scopus ID: 55964196100, SPIN: 8950-4440, paveltatarinov@mail.ru

Ilya A. YAKUSHEV – Doct. of Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Fundamental and Applied Mathematics, Polytechnic Institute (branch) M.K. Ammosov North-Eastern Federal University in Mirny, Mirny, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-2539-7334>, ResearcherID: AAO-4495-2020, Scopus ID: 55220843700, SPIN: 7671-3618, yakushevilya@mail.ru

Конфликт интересов

Семенов Александр Сергеевич является членом редколлегии журнала *Вестник Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова*

Conflict of interests

Aleksandr S. Semenov is a member of editorial board of *Vestnik of North-Eastern Federal University*

Вклад авторов

Семёнов А. С. – разработка концепции, проведение исследования, создание черновика рукописи

Татаринов В. П. – визуализация, ресурсное обеспечение исследования

Татаринов П. С. – методология, программное обеспечение, администрирование данных

Якушев И. А. – проведение статистического анализа, верификация данных, редактирование рукописи

Authors' contribution

Aleksandr S. Semenov – conceptualization, investigation, writing-original draft

Vladimir P. Tatarinov – visualization, resources

Pavel S. Tatarinov – methodology, software, data curation

Ilya A. Yakushev – formal analysis, validation, writing-review & editing

Поступила в редакцию / Submitted 21.08.2025

Поступила после рецензирования / Revised 10.11.2025

Принята к публикации / Accepted 01.12.2025