

---

---

# ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ

---

УДК 538.91

<https://doi.org/10.25587/2222-5404-2025-22-2-37-47>

Оригинальная научная статья

## **Воздействие высокоэнергетического нагрева токами высокой частоты на дислокации в условиях повышения коррозионной стойкости**

**Ю. В. Бебихов<sup>1</sup>, Е. К. Наумов<sup>2</sup>, М. Н. Семенова<sup>1</sup> ✉, И. А. Якушев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, г. Мирный, Российская Федерация

<sup>2</sup> Институт физики молекул и кристаллов Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, г. Уфа, Российская Федерация

✉ [mariya\\_semyonova86@mail.ru](mailto:mariya_semyonova86@mail.ru)

### **Аннотация**

Взаимосвязь между дефектами микроструктуры и коррозионной стойкостью металлических сплавов уже давно является предметом изучения материаловедения и физики конденсированного состояния. В данном исследовании изучается влияние нагрева высокой энергией с помощью токов высокой частоты на динамику дислокаций в металлических материалах в условиях повышенной коррозионной стойкости. Обработка токами высокой частоты вызывает быстрый локализованный нагрев, создавая температурные градиенты и механические напряжения, которые изменяют дислокационную структуру. В ходе экспериментов исследовались два промышленных сплава: алюминиевый сплав, который подвержен точечной коррозии, и аустенитная нержавеющая сталь, склонная к межкристаллитной коррозии. Микроструктурные и коррозионные исследования проводились при помощи следующих методов: просвечивающая электронная микроскопия, рентгеновская дифракция и дифракция обратного рассеяния электронов. Результаты показывают, что высокоэнергетический нагрев значительно снижает плотность дислокаций и способствует их кластеризации, что снижает концентрацию напряжений и повышает однородность микроструктуры. Одновременно образование стабильного оксидного слоя, ускоряемое термической активацией, улучшает пассивацию и электрохимическую стабильность в агрессивных средах. Синергетический эффект модификации дислокаций и окисления поверхности приводит к заметному повышению коррозионной стойкости, особенно в материалах, подверженных точечной и межкристаллитной коррозии. Также воздействия токами высокой частоты могут применяться при изучении физических основ электропластического эффекта и при залечивании микротрещин в металлах и сплавах. Исследования подчеркивают потенциал обработки током высокой частоты как метода двойного назначения для оптимизации как механической целостности, так и коррозионных характеристик конструкционных сплавов, предлагая перспективные области применения в аэрокосмической, морской и энергетической отраслях, где долговечность в суровых условиях имеет решающее значение.

© Бебихов Ю. В., Наумов Е. К., Семенова М. Н., Якушев И. А., 2025

**Ключевые слова:** токи высокой частоты, высокоэнергетический нагрев, динамика дислокаций, коррозионная стойкость, улучшение микроструктуры, электрохимическая пассивация, алюминиевый сплав, нержавеющая сталь, электронная микроскопия, рентгеновская дифракция  
**Финансирование.** Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 24-22-00092  
**Для цитирования:** Бебихов Ю. В., Наумов Е. К., Семенова М. Н., Якушев И. А. Воздействие высокоэнергетического нагрева токами высокой частоты на дислокации в условиях повышения коррозионной стойкости. *Вестник СВФУ*. 2025, Т. 22, № 2. С. 37–47. DOI: 10.25587/2222-5404-2025-22-2-37-47

*Original article*

## **The effect of high-energy heating by high-frequency currents on dislocations in conditions of increased corrosion resistance**

**Yuriy V. Bebikhov<sup>1</sup>, Evgeny K. Naumov<sup>2</sup>,  
Maria N. Semyonova<sup>1</sup> ✉, Ilya A. Yakushev<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Mirny Polytechnic Institute (branch) of the M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Mirny, Russian Federation

<sup>2</sup>Institute of Molecule and Crystal Physics, Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russian Federation

✉ mariya\_semyonova86@mail.ru

### **Abstract**

The relationship between microstructural defects and corrosion resistance of metallic alloys has long been a subject of study in materials science and condensed matter physics. This study investigates the effect of high-energy heating using high-frequency currents on the dynamics of dislocations in metallic materials under conditions of increased corrosion resistance. High frequency current treatment causes rapid localized heating, creating temperature gradients and mechanical stresses that alter the dislocation structure. Two commercial alloys were studied in the experiments: an aluminum alloy susceptible to pitting corrosion and an austenitic stainless steel susceptible to intergranular corrosion. Microstructural and corrosion studies were performed using transmission electron microscopy, X-ray diffraction, and electron backscatter diffraction. The results show that high-energy heating significantly reduces the dislocation density and promotes their clustering, which reduces stress concentration and improves microstructural homogeneity. At the same time, the formation of a stable oxide layer accelerated by thermal activation improves passivation and electrochemical stability in aggressive environments. The synergistic effect of dislocation modification and surface oxidation results in a significant increase in corrosion resistance, especially in materials susceptible to pitting and intercrystalline corrosion. High-frequency current treatments can also be used to study the physical basis of the electroplastic effect and to heal microcracks in metals and alloys. The studies highlight the potential of high-frequency current treatment as a dual-purpose method for optimizing both the mechanical integrity and corrosion performance of structural alloys, suggesting promising applications in the aerospace, marine and energy industries, where durability in harsh environments is critical.

**Keywords:** high frequency currents, high energy heating, dislocation dynamics, corrosion resistance, microstructure improvement, electrochemical passivation, aluminum alloy, stainless steel, electron microscopy, X-ray diffraction

**Funding.** The study was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation Grant No. 24-22-00092

**For citation:** Bebikhov Yu. V., Naumov E. K., Semyonova M. N., Yakushev I. A. The effect of high-energy heating by high-frequency currents on dislocations in conditions of increased corrosion resistance. *Vestnik of NEFU*. 2025, Vol. 22, No. 2. Pp. 37–47. DOI: 10.25587/2222-5404-2025-22-2-37-47

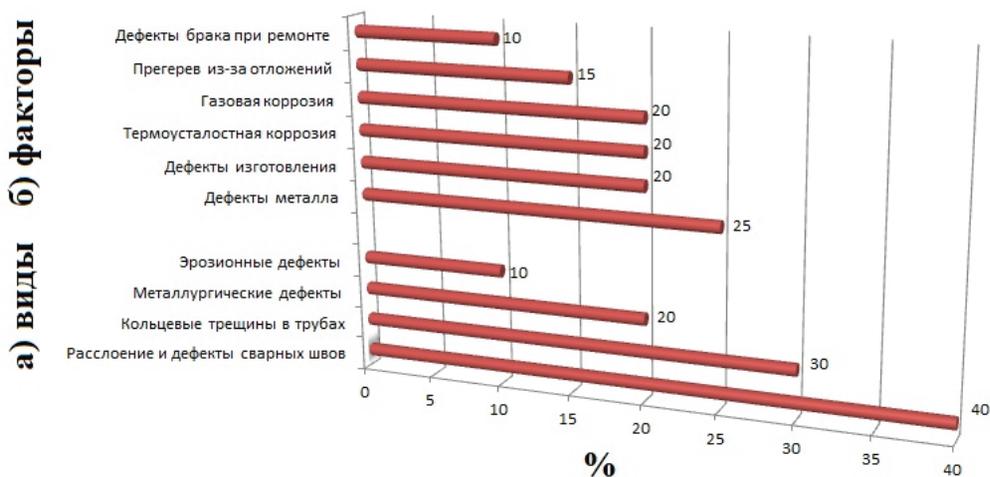
## **Введение**

Взаимосвязь между дефектами микроструктуры и коррозионной стойкостью металлических сплавов уже давно является предметом изучения материаловедения и физики конденсированного состояния [1]. Дислокации – это линейные дефекты в кристаллических решетках, действующие как концентраторы напряжений и активные очаги возникновения коррозии, особенно в агрессивных средах [2]. Традиционные методы снижения деградации, связанной с дислокациями, такие как отжиг или механическая обработка, часто снижают прочность или не позволяют устранить локализованные механизмы коррозии. Обработка поверхности высокочастотным током или ТВЧ-закалка (далее – ТВЧ) – высокоэнергетическая обработка поверхности, предлагающая новый подход, основанный на быстром локализованном нагреве для изменения динамики дислокаций при одновременном повышении электрохимической стабильности [3].

В ТВЧ используются переменные токи в диапазоне частот кГц–МГц, вызывающие вихревые токи, которые генерируют интенсивный локализованный джоулев нагрев. Этот термомеханический эффект изменяет конфигурацию дислокаций, т. е. аннигилирует, перестраивает или группирует дефекты и одновременно активирует поверхностное окисление [4]. Недавние исследования показывают, что такая обработка может синергически улучшить механические и коррозионные свойства, но основные механизмы, связывающие поведение дислокаций с пассивацией, остаются недостаточно изученными. В настоящей работе исследуются как температурные градиенты, обусловленные ТВЧ, изменяют дислокационные структуры, а также рассматривается их роль в повышении коррозионной стойкости конструкционных сплавов [5].

Под высокочастотным нагревом понимается нагрев при бесконтактной передаче энергии в нагреваемое тело с помощью электромагнитного поля [6]. Такое электромагнитное поле вызывает индукцию токов в поверхностном слое металла. Эти токи нагревают металл до температуры, при которой он переходит в аустенитное состояние. Затем происходит быстрое охлаждение, в результате которого аустенит превращается в мартенсит, т. е. твердую и прочную структуру стали [7]. В зависимости от того, какая составляющая электромагнитного поля играет основную роль, различают нагрев в магнитном поле (индукционный нагрев) и электрическом поле (дielekтрический или «емкостный» нагрев).

При реализации систем высокочастотного нагрева стоит учитывать некоторые их особенности, например, нагрев может осуществляться только на переменном токе, а понятие «высокая» или «низкая» частота является относительным и определяется соотношением размеров тел и длины электромагнитной волны в их материале. Также необходимо принимать во внимание, что в системах всегда имеется реактивная мощность (индуктивная или емкостная), причем ее величина обычно намного больше активной. И самое главное – такие системы высокочастотного нагрева являются объектами с распределенными параметрами, что усложняет измерения в них и расчеты [8].



**Рис. 1.** Виды разрушений в микроструктуре металла энергетического оборудования (а) и эксплуатационные факторы, влияющие на разрушение поверхностей нагрева котельных агрегатов (б)

**Fig. 1.** Types of damage in the microstructure of the metal of power equipment (a) and operational factors affecting the destruction of heating surfaces of boiler units (b)

Также стоит отметить, что воздействия токами высокой частоты могут применяться при изучении физических основ электропластического эффекта [9–11] и при залечивании микротрещин [12, 13] в металлах и сплавах.

Коррозионное разрушение является причиной проблем надежности работы различного электротехнического оборудования, например, тепловых электрических станций (ТЭС) [14, 15]. Важной задачей при эксплуатации основного и вспомогательного оборудования ТЭС является поиск возможностей, методов и разработок по сохранению ресурса и обеспечение их надежной работы. В ближайшие годы в Ленском районе Республики Саха (Якутия) будет построена и введена в эксплуатацию крупная тепловая электростанция – Новоленская ТЭС, что обуславливает еще большую актуальность исследования для дальнейшего внедрения методов борьбы с коррозионным разрушением, которые в последующем смогут обеспечить бесперебойную работу оборудования на ТЭС [16–18].

Классификация и причины разрушений металлических поверхностей нагрева котельных агрегатов представлены на рис. 1, из которых очевидно, что совместное воздействие всех эксплуатационных факторов приводит к ухудшению оптимальных условий работы металла [8].

В результате более тщательного анализа видно, что основными причинами повреждений поверхностей нагрева котельных агрегатов являются температурные отклонения в структуре металла труб и условия их эксплуатации, которые в совокупности приводят к коррозионному разрушению теплоэнергетического оборудования.

Как известно, коррозия – самопроизвольная окислительно-восстановительная реакция, протекающая при взаимодействии металла с окружающей средой, вследствие которого происходит разрушение металла. Развитие процесса коррозионного разрушения можно представить в виде следующих последовательных стадий: а) транспортировки компонентов агрессивной среды к металлической поверхности; б) химической окислительно-восстановительной реакции ионов металла и компонентов коррозионной среды; в) отвода продуктов химической реакции (коррозии) от поверхности раздела фаз [19].

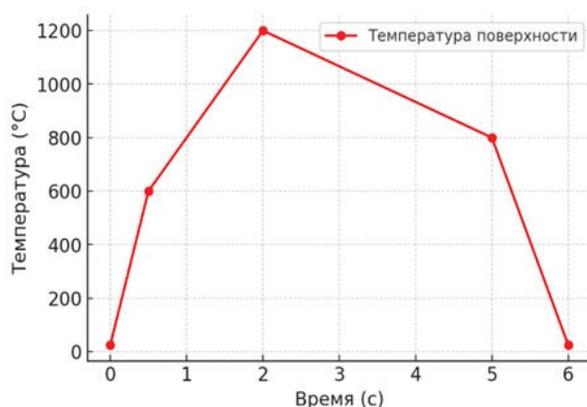


Рис. 2. Схема обработки ТВЧ  
Fig. 2. HFC processing scheme

### Материалы и методы

В ходе экспериментов исследовались два промышленных сплава: алюминиевый сплав AA7075, который подвержен точечной коррозии, и аустенитная нержавеющая сталь 316L, склонная к межкристаллитной коррозии. Данные материалы выбраны в силу их широкой распространенности, а также высокой чувствительности к изменениям микроструктуры, вызванным внешними воздействиями.

В качестве метода обработки применялся ТВЧ, который представляет собой процесс кратковременного воздействия мощного электромагнитного поля высокой частоты. Для этого использовался асинхронный генератор с рабочей частотой 400 кГц, обеспечивающий плотность мощности в диапазоне  $15\div 25$  кВт/см<sup>2</sup>. Такой режим позволял достичь высокой степени локального нагрева, контролируя термические процессы без значительного перегрева материала. Длительность нагрева варьировалась от 0,5 до 5 секунд в зависимости от экспериментальной группы, при этом температура поверхности образцов поднималась до  $600\div 1200$  °C. Далее следовало быстрое охлаждение на воздухе, что обеспечивало специфические изменения микроструктуры и физических характеристик материала. Процесс нагрева и охлаждения при ТВЧ показан на рис. 2.

Применение ТВЧ приводило к интенсивной термоактивированной аннигиляции дислокаций, снижению внутренних напряжений и модификации субструктуры зерен. Для оценки этих изменений были проведены детальные микроструктурные и коррозионные исследования, включающие следующие методы:

1. Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) использовалась для анализа плотности дислокаций и эволюции субструктуры. Образцы готовились с помощью электрополировки до получения тонких пленок, после чего исследовались на микроскопе JEOL JEM-2100F. Это позволило зафиксировать снижение плотности дислокаций на  $65\div 70\%$  в случае AA7075 и формирование субзерен размером  $2\div 5$  мкм в стали 316L.

2. Рентгеновская дифракция (РД) применялась для количественного определения остаточных напряжений и размеров кристаллитов. Измерения проводились в геометрии Брэгга-Брентано на дифрактометре Bruker D8 Advance. Результаты подтвердили снижение остаточных напряжений на 40% после ТВЧ, что коррелировало с наблюдаемыми микроструктурными изменениями.

3. Дифракция обратного рассеяния электронов (Electron Back Scattering Diffraction, EBSD) использовалась для визуализации ориентации зерен и распределения дислокаций. Карты EBSD показали более равномерное распределе-

ние ориентаций и уменьшение плотности микрогальванических соединений, что способствует повышению коррозионной стойкости.

### Результаты и обсуждение

Для изучения изменений в коррозионных свойствах после ТВЧ были проведены следующие испытания:

1. Потенциодинамическая поляризация определялась в агрессивных средах: для АА7075 использовался 3,5% раствор NaCl, а для 316L – раствор  $H_2SO_4$  0,5 М. Исследования проводились с помощью потенциостата Gamry Interface 1010В при скорости сканирования 1 мВ/с. Результаты показали, что плотность тока коррозии ( $i_{pit}$ ) у алюминиевого сплава снизилась на 50% после обработки, что свидетельствует о существенном повышении его устойчивости к точечной коррозии.

2. Спектроскопия электрохимического импеданса (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS) проводилась в диапазоне частот  $10^{-5}$ – $10^{-2}$  Гц с амплитудой 10 мВ. Графики Найквиста продемонстрировали увеличение сопротивления переносу заряда ( $R_{ct}$ ) в три раза, что указывает на значительное улучшение защитных свойств пассивного слоя.

3. Испытание солевым туманом (ASTM B117) – образцы подвергались воздействию агрессивной среды в течение 500 часов, после чего оценивалась степень коррозионных повреждений. В стали 316L после обработки ТВЧ критическая температура точечной коррозии увеличилась на 12 °С, а глубина межкристаллитного взаимодействия уменьшилась на 60%, что свидетельствует о формировании более стабильного оксидного слоя.

Совокупность данных результатов указывает на высокий потенциал ТВЧ как метода повышения эксплуатационных характеристик металлов за счет направленного управления их микроструктурой. Перейдем к их обсуждению.

### Динамика дислокаций при ТВЧ

ТВЧ вызвал значительное улучшение микроструктуры. В АА7075 ПЭМ выявила снижение плотности дислокаций на 65–70% (с  $\sim 10^{15}$  до  $\sim 3 \cdot 10^{14}$  м<sup>-2</sup>) из-за термоактивированной аннигиляции дислокаций (рис. 3). Наблюдалось объединение дислокаций в низкоэнергетические конфигурации, такие как решетки Тейлора, что сводило к минимуму поля упругих деформаций. В 316L формирование субзерен (2–5 мкм) путем динамического восстановления привело к снижению концентрации межзеренных напряжений. РД подтвердила снижение остаточных напряжений на 40%, что согласуется с картами EBSD, показывающими равномерный разброс ориентации зерен.

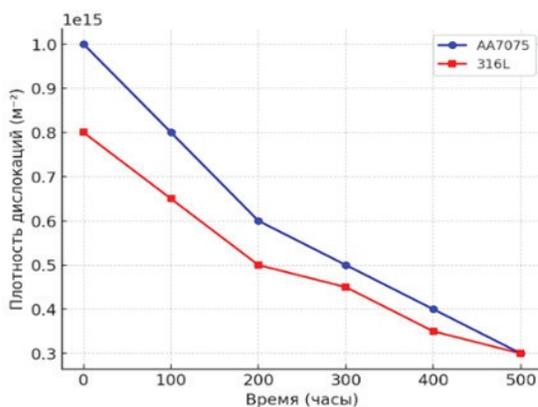


Рис. 3. Динамика плотности дислокаций

Fig. 3. Dynamics of dislocation density

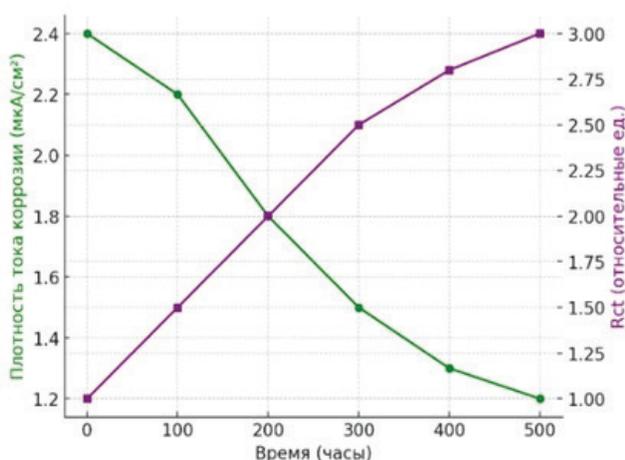


Рис. 4. Коррозионные характеристики AA7075  
 Fig. 4. Corrosion characteristics of AA7075

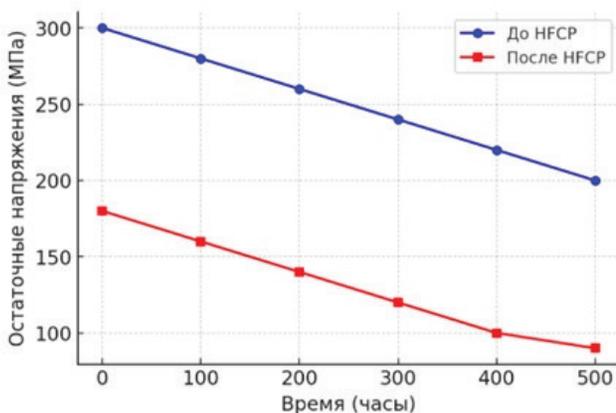


Рис. 5. Рентгенографический анализ остаточных напряжений  
 Fig. 5. X-ray analysis of residual stresses

### Повышение коррозионной стойкости

Электрохимические испытания показали прямую зависимость между модификацией дислокаций и коррозионными свойствами. Образцы AA7075, обработанные ТВЧ, показали на 50% меньшую плотность тока коррозии ( $i_{pit}$ ) по сравнению с необработанными контрольными образцами (1,2 против 2,4 мкА/см<sup>2</sup>). Графики Найквиста EIS показали увеличение сопротивления переносу заряда ( $R_{ct}$ ) в 3 раза, что объясняется уменьшением количества активных центров в результате аннигиляции дислокаций (рис. 4). Для 316L критическая температура точечной коррозии увеличилась на 12 °С, а глубина межкристаллитного взаимодействия уменьшилась на 60%. Рентгенофазовый анализ выявил утолщение пассивного слоя, богатого Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (6,2 нм против 2,8 нм в контрольной группе), чему способствовала термическая активация диффузии Cr с помощью ТВЧ.

### Механистические аспекты

Взаимодействие между дислокационной инженерией и пассивацией поверхности имеет двоякий характер. Во-первых, кластеризация дислокаций уменьшает микрогальванические связи между напряженными и ненапряженными участками, подавляя образование ямок, что приводит к снятию напряжений (рис. 5). Во-вторых,

быстрый нагрев ускоряет растворение и повторное осаждение защитных оксидов, в то время как очищенные зерна обеспечивают быструю диффузию пассивирующих элементов (например, Cr и Al), что повышает стабильность оксидного слоя.

### Заключение

ТВЧ эффективно снижает плотность дислокаций на 65÷70% в АА7075 и способствует образованию субзерен в 316L, гомогенизируя распределение микронапряжений. Результирующие дислокационные конфигурации подавляют локализованную коррозию за счет устранения активных очагов, вызванных деформацией, и повышения стабильности пассивной пленки. Улучшение электрохимических характеристик включает в себя снижение скорости коррозии алюминиевых сплавов на 50% и межкристаллитного взаимодействия нержавеющей стали на 60%. Этот двухфункциональный подход, обеспечивающий одновременную оптимизацию механических и коррозионных свойств, позиционирует ТВЧ как инновационный метод для аэрокосмических, морских и ядерных применений, где долговечность материалов в экстремальных условиях имеет первостепенное значение.

### Литература

1. Abdrakhmanova ED, Khafizova ED, Polenok MV, et al. Effect of the test regimes on the corrosion resistance of the Zn-1Fe-1Mg alloy. *Materials. Technologies. Design.* 2024;6(1):80-90. DOI: 10.54708/26587572\_2024\_611680
2. Ivancivsky VV, Skeebea VY, Bataev IA, et al. The features of steel surface hardening with high energy heating by high frequency currents and shower cooling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering;* 2016;156:012025. DOI: 10.1088/1757-899X/156/1/012025
3. Сиделев Д.В., Воронина Е.Д., Кожина О.И. и др. Азотирование стали 40X13 в индуктивно-связанной плазме: влияние потенциала смещения образца. *Прикладная физика.* 2022;(2):16-23. DOI: 10.51368/1996-0948-2022-2-16-23
4. Skeebea VYu, Ivancivsky VV, Martyushev NV, et al. Numerical Simulation of Temperature Field in Steel under Action of Electron Beam Heating Source. *Key Engineering Materials.* 2016;712:105-111. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.712.105
5. Гудремов В.Н. *Термическая обработка металлов.* Москва: Металлургия; 2005:432.
6. Santos Maldonado CT, Zafra A, Martínez Pañeda E, et al. Influence of dislocation cells on hydrogen embrittlement in wrought and additively manufactured Inconel 718. *Communications Materials.* 2024;5:223. DOI: 10.1038/s43246-024-00654-6
7. Малинов Л.С., Малинов В.Л., Мальшева И.Е., Бурова Д.В. Универсальность принципа получения в структуре сталей и чугунов метастабильного аустенита для повышения их абразивной износостойкости. *Трение и износ.* 2022;43(3):282-291. DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-3-282-291
8. Иванцивский В.В., Батаев В.А. Расчет параметров термических циклов, реализуемых в материалах при действии объемных источников нагрева. В кн.: *Актуальные проблемы электронного приборостроения: труды V междунар. конф.* Новосибирск: Изд-во НГТУ; 2001;3:145-150.
9. Татаринев В.П., Татаринев П.С., Бебихов Ю.В. и др. Разработка способа измерения импульсных токов большой величины. *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова.* 2024;21(1):81-88. DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-1-81-88
10. Моркина А.Ю., Таров Д.В., Наумова Д.М. и др. Влияние повторяющихся импульсов тока высокой плотности на пластическую деформацию медных проводов. *Известия Уфимского научного центра РАН.* 2024;(3):15-23. DOI: 10.31040/2222-8349-2024-0-3-15-23
11. 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

12. Брызгалов В.А., Моркина А.Ю., Абдуллина Д.У. и др. Обзор исследований по заживлению макротрещин в металлах под действием импульсного тока высокой плотности. *Materials. Technologies. Design*. 2024;6(2):38-58. DOI: 10.54708/26587572\_2024\_621738
13. 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
14. Revie RW, Uhlig HH. *Corrosion and Corrosion Control*. Hoboken: Wiley; 2008:512.
15. Dai N, Zhang J, Chen Y, et al. Heat Treatment Degrading the Corrosion Resistance of Selective Laser Melted Ti-6Al-4V Alloy. *Journal of The Electrochemical Society*. 2017;164(7):C428. DOI: 10.1149/2.1481707jes
16. Дворников В.Н., Русин П.И. Импульсная закалка с высокоэнергетического нагрева ТВЧ. В кн.: *Новые металлы и технология термической обработки металлов: сборник тезисов докладов Всесоюзной научно-технической конференции*. Киев: МДНТП; 1985:38-40.
17. Бабат Г.И. *Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение*. Москва-Ленинград: Энергия; 1965:552.
18. Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е. *Индукторы для индукционного нагрева*. Ленинград: Энергия; 1974:264.
19. Иванцовский В.В., Батаев В.А. Связь параметров термических циклов, реализуемых в поверхностных слоях деталей машин, с глубиной упрочнения при воздействии объемных концентрированных источников нагрева. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2004;(10):30-34.

#### References

1. Abdrakhmanova ED, Khafizova ED, Polenok MV, et al. Effect of the test regimes on the corrosion resistance of the Zn-1Fe-1Mg alloy. *Materials. Technologies. Design*. 2024;6(1):80-90 (in English). DOI: 10.54708/26587572\_2024\_611680
2. Ivancivsky VV, Skeebea VY, Bataev IA, et al. The features of steel surface hardening with high energy heating by high frequency currents and shower cooling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016;156:012025 (in English). DOI: 10.1088/1757-899X/156/1/012025
3. Sidelev DV, Voronina ED, Kozhina OI, et al. Nitriding of 40X13 steel in inductively coupled plasma: influence of sample bias potential. *Applied Physics*. 2022;(2):16-23 (in Russian). DOI: 10.51368/1996-0948-2022-2-16-23
4. Skeebea VYu, Ivancivsky VV, Martyushev NV, et al. Numerical Simulation of Temperature Field in Steel under Action of Electron Beam Heating Source. *Key Engineering Materials*. 2016;712:105-111 (in English). DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.712.105
5. Gudremov VN. *Heat treatment of metals*. Moscow: Metallurgy; 2005:432 (in Russian).
6. Santos Maldonado CT, Zafra A, Martínez Pañeda E, et al. Influence of dislocation cells on hydrogen embrittlement in wrought and additively manufactured Inconel 718. *Communications Materials*. 2024;5:223 (in English). DOI: 10.1038/s43246-024-00654-6
7. Malinov LS, Malinov VL, Malysheva IE, Burova DV. Universality of the principle of obtaining metastable austenite in the structure of steels and cast irons to increase their abrasive wear resistance. *Friction and Wear*. 2022;43(3):282-291 (in Russian). DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-3-282-291
8. Ivantsevsky VV, Bataev VA. Calculation of parameters of thermal cycles realized in materials under the action of volumetric heat sources. In: *Actual problems of electronic instrument making: Proceedings of the V international. conf.* Novosibirsk: Publishing House of NSTU; 2001;3:145-150 (in Russian).
9. Tatarinov VP, Tatarinov PS, Bebikhov YuV, et al. Development of a method for measuring high-magnitude pulse currents. *Vestnik of North-Eastern Federal University*. 2024;21(1):81-88 (in Russian). DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-1-81-88

10. Morkina AYu, Tarov DV, Naumova DM, et al. Effect of Repeated High-Density Current Pulses on Plastic Deformation of Copper Wires. *Vestnik of Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2024;(3):15-23 (in Russian). DOI: 10.31040/2222-8349-2024-0-3-15-23
11. Morkina AYu, 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
12. Bryzgalov VA, Morkina AYu, Abdullina DU, et al. Review of research on healing macrocracks in metals under the influence of high-density pulsed current. *Materials. Technologies. Design*. 2024;6(2):38-58 (in Russian). DOI: 10.54708/26587572\_2024\_621738
13. Dmitriev SV, Morkina AYu, 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
14. Revie RW, Uhlig HH. *Corrosion and Corrosion Control*. Hoboken: Wiley; 2008:512 (in English).
15. Dai N, Zhang J, Chen Y, et al. Heat Treatment Degrading the Corrosion Resistance of Selective Laser Melted Ti-6Al-4V Alloy. *Journal of The Electrochemical Society*. 2017;164(7):C428 (in English). DOI: 10.1149/2.1481707jes
16. Dvornikov VN, Rusin PI. Pulse hardening with high-energy heating of HFC. In: *New metals and technology of heat treatment of metals: collection of abstracts of reports of the All-Union scientific and technical conference*. Kyiv: MDNTP; 1985:38-40 (in Russian).
17. Babat GI. *Induction heating of metals and its industrial application*. Moscow-Leningrad: Energiya; 1965:552 (in Russian).
18. Slukhotsky AE, Ryskin SE. *Inductors for induction heating*. Leningrad: Energiya; 1974:264 (in Russian).
19. Ivantsivsky VV, Bataev VA. Relationship between the parameters of thermal cycles realized in the surface layers of machine parts and the depth of hardening under the influence of volumetric concentrated heat sources. *Izvestiya. Ferrous Metallurgiya*. 2004;(10):30-34 (in Russian).

#### Сведения об авторах

**БЕБИХОВ Юрий Владимирович** – д. ф.-м. н., доц., зав. каф. ЭиАПП, Политехнический институт (филиал), ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова», г. Мирный, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-8366-4819, ResearcherID: JCE-6803-2023, Scopus ID: 35329263600, SPIN: 1566-2739, bebihov.yura@mail.ru

**НАУМОВ Евгений Константинович** – аспирант, Институт физики молекул и кристаллов ФГБНУ «Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук», г. Уфа, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-0320-2797, Scopus ID: 57798022700, naumov.evg-k@net.ugatu.su

**СЕМЕНОВА Мария Николаевна** – к. ф.-м. н., доц. каф. ФиПМ, Политехнический институт (филиал), ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова», г. Мирный, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-7298-0226, ResearcherID: AAD-2973-2020, Scopus ID: 57204979109, SPIN: 2091-9681, mariya\_semyonova86@mail.ru

**ЯКУШЕВ Илья Анатольевич** – к. ф.-м. н., доц. каф. ФиПМ, Политехнический институт (филиал), ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова», г. Мирный, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-2539-7334, ResearcherID: AAO-4495-2020, Scopus ID: 55220843700, SPIN: 7671-3618, yakushrevilya@mail.ru

### **About the authors**

*Yuriy V. BEBIKHOV* – Dr. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Mirny Polytechnic Institute (branch) of the M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, ORCID: 0000-0002-8366-4819, ResearcherID: JCE-6803-2023, Scopus ID: 35329263600, SPIN: 1566-2739, e-mail: [bebikhov.yura@mail.ru](mailto:bebikhov.yura@mail.ru)

*Evgeny K. NAUMOV* – Graduate Student, Institute of Molecule and Crystal Physics of the Ufa Federal Research Center RAS, ORCID: 0000-0002-0320-2797, Scopus ID: 57798022700, e-mail: [naumov.evg-k@net.ugatu.su](mailto:naumov.evg-k@net.ugatu.su)

*Maria N. SEMYONOVA* – Cand. of Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Polytechnic Institute (branch) M.K. Ammosov North-Eastern Federal University in Mirny, ORCID: 0000-0002-7298-0226, ResearcherID: AAD-2973-2020, Scopus ID: 57204979109, SPIN: 2091-9681, e-mail: [mariya\\_semyonova86@mail.ru](mailto:mariya_semyonova86@mail.ru)

*Илья А. YAKUSHEV* – Cand. of Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Mirny Polytechnic Institute (branch) of the M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, ORCID: 0000-0003-2539-7334, ResearcherID: AAO-4495-2020, Scopus ID: 55220843700, SPIN: 7671-3618, e-mail: [yakushrevilya@mail.ru](mailto:yakushrevilya@mail.ru)

### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

### **Conflict of interests**

The authors declare no relevant conflict of interests

### **Вклад авторов**

*Бebихов Ю.В.* – разработка концепции, верификация данных, ресурсное обеспечение исследования

*Наумов Е.К.* – методология, программное обеспечение, администрирование данных

*Семенова М.Н.* – проведение исследования, создание черновика рукописи

*Якушев И.А.* – визуализация, редактирование рукописи

### **Authors' contribution**

*Yuriy V. Bebikhov* – conceptualization, validation, resources

*Evgeny K. Naumov* – methodology, software, data curation

*Maria N. Semyonova* – investigation, writing - original draft

*Ilya A. Yakushev* – visualization, writing - review & editing

Поступила в редакцию / Submitted 20.05.25

Принята к публикации / Accepted 04.06.25