

Научная статья

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 620.22

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.03.010

**ОБЗОР ПОСЛЕДНИХ РАБОТ ПО ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ  
СТАЛЕЙ С ЦЕЛЬЮ УЛУЧШЕНИЯ ИХ СВОЙСТВ****Сугоняко Илья Сергеевич<sup>1†</sup>, Моркина Алина Юрьевна<sup>2</sup>,  
Таров Данила Владимирович<sup>3</sup>, Татаринов Павел Семенович<sup>4</sup>,  
Бebихов Юрий Владимирович<sup>5</sup>, Семенов Александр Сергеевич<sup>6</sup>,  
Корзникова Елена Александровна<sup>7</sup>, Дмитриев Сергей Владимирович<sup>8</sup>**<sup>1,2,8</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет, ул. Космонавтов 1, 450062, Уфа, Россия<sup>2,3,7</sup>Уфимский университет науки и технологий, ул. Заки Валиди 32, 450076, Уфа, Россия<sup>2,8</sup>Институт проблем сверхпластичности металлов, ул. Степана Халтурина 39, 450001, Уфа, Россия<sup>4,5,6</sup>Политехнический институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова» в г. Мирном, ул. Тихонова 5, 678170, Мирный, Россия<sup>8</sup>Институт физики молекул и кристаллов, Уфимский федеральный исследовательский центр РАН, пр. Октября, 71, 450054, Уфа, Россия<sup>1</sup>sgnilya@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-0129-7770><sup>2</sup>alinamorkina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3989-0376><sup>3</sup>tarovdv@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-4539-1248><sup>4</sup>paveltatarinov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7430-8591><sup>5</sup>bebikhov.yura@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8366-4819><sup>6</sup>sash-alex@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9940-3915><sup>7</sup>elena.a.korznikova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5975-4849><sup>8</sup>dmitriev.sergey.v@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6744-4445>

**Аннотация.** Электроимпульсная обработка (ЭИО) сталей, основанная на электропластическом эффекте (ЭПЭ), нашла широкое применение в разных отраслях промышленности. ЭПЭ чаще всего объясняется совместным воздействием тепловых эффектов (неоднородное выделение джоулева тепла на дефектах структуры), атермических эффектов (действие электронного ветра, скин-эффект, взаимодействие дислокаций с локальными стопорами) и воздействием магнитного поля (пинч-эффект, спиновое разупрочнение металла). ЭИО обычно применяют с целью залечивания дефектов (усталостных трещин или пор), улучшения микроstructures (измельчения зерен, изменения фазового состава, осуществления фазовых превращений, растворения нежелательных частиц), повышения механических свойств (пластичности), повышения коррозионной стойкости и износостойкости, снижения остаточных напряжений и повышения эффективности методов обработки металлов давлением (вытяжки, прокатки, и т.д.). Целью данного обзора был анализ работ и обобщение достижений по ЭИО сталей за последние несколько лет. Были рассмотрены работы по ЭИО различных сталей для каждой из выше перечисленных целей. Кроме того, среди новых достижений в области ЭИО можно выделить применение этого метода для улучшения микроstructures сталей, полученных технологиями аддитивного производства. Также в настоящее время при изучении ЭИО начинают применяться компьютерное моделирование (например, метод конечных элементов) и методы машинного обучения.

**Ключевые слова:** электроимпульсная обработка, электропластический эффект, микроstructure, дефекты, трещины, механические свойства, коррозионная стойкость.

**Благодарности:** Эксперименты проведены сотрудниками кафедры «Оборудование и технологии сварки и контроля» Уфимского государственного нефтяного технического университета, Центра реверсивного инжиниринга Межвузовского студенческого кампуса Евразийского научно-образовательного центра Республики Башкортостан. Исследование выполнено в рамках программы Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «ПРИОРИТЕТ 2030».

**Для цитирования:** Сугомяко И.С. Моркина А.Ю., Таров Д.В., Татаринов П.С., Бebихов Ю.В., Семенов А.С., Корзникова Е.А., Дмитриев С.В. Обзор последних работ по электроимпульсной обработке сталей с

Original article

## REVIEW OF RECENT WORK ON ELECTRIC PULSE TREATMENT OF STEELS TO IMPROVE THEIR PROPERTIES

Илья С. Сугоняко<sup>1†</sup>, Алина Я. Моркина<sup>2†</sup>, Данила В. Таров<sup>3</sup>, Павел С. Татаринов<sup>4</sup>,  
Юри В. Бибихов<sup>5</sup>, Александр С. Семенов<sup>6</sup>, Елена А. Корзникова<sup>7</sup>, Сергей В. Дмитриев<sup>8</sup>

<sup>1,2,8</sup>Ufa State Petroleum Technological University, Kosmonavtov St. 1, 450062, Ufa, Russia

<sup>2,3,7</sup>Ufa University of Science and Technology, Zaki Validi St. 32, 450076, Ufa, Russia

<sup>2,8</sup>Institute for Metals Superplasticity Problems, Russian Academy of Sciences, Khalturin St. 39, 450001, Ufa, Russia

<sup>4,5,6</sup>Polytechnic Institute (branch) of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education «North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov», Tikhonova St. 5, 678170, Mirny, Russia.

<sup>8</sup>Institute of Molecule and Crystal Physics, Ufa Federal Research Centre of RAS, Oktyabrya Pr., 71, Ufa, 450054, Russia

<sup>1</sup>sgnilya@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-0129-7770>

<sup>2</sup>alinamorkina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3989-0376>

<sup>3</sup>tarovdv@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-4539-1248>

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

<sup>5</sup>bebikhov.yura@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8366-4819>

<sup>6</sup>sash-alex@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9940-3915>

<sup>7</sup>elena.a.korznikova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5975-4849>

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

**Abstract.** Electric pulse treatment (EPT) of steels based on the electroplastic effect (EPE) has found wide application in various branches of industry. The EPE is most often explained by the combined effect of thermal effects (non-uniform release of joule heat on structural defects), athermal effects (the effect of the electron wind, the skin effect, and the interaction of dislocations with local stoppers), and the effect of a magnetic field (the pinch effect and the spin softening of the metal). EPT is usually applied for the purpose of healing defects (fatigue cracks or pores), improving microstructure (grain refinement, changing phase composition, performing phase transformations, dissolving precipitates), increasing mechanical properties (plasticity), increasing corrosion resistance and wear resistance, reducing residual stresses and increasing the efficiency of metal processing methods (drawing, rolling, etc.). The purpose of this review was to analyze the work and summarize the achievements in the EPT of steels over the past few years. The works on EPT of various steels for each of the above-mentioned purposes were reviewed. In addition, new achievements in the field of EPT include the use of this method to improve the microstructure of steels produced using additive manufacturing technologies. Computer simulations (such as finite element methods) and machine learning techniques are also being used in the study of EPT.

**Keywords:** electric pulse treatment, electroplastic effect, microstructure, defects, cracks, mechanical properties, corrosion resistance.

**Acknowledgements:** The experiments were conducted by a team of the department of «Equipment and technologies of welding and control» of Ufa State Petroleum Technological University and the Reverse Engineering Center of the Interuniversity Student Campus of the Eurasian Scientific and Educational Center of the Republic of Bashkortostan. The research was carried out within the framework of the program of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation «PRIORITY 2030».

**For citation:** Sugonyako I.S. Morkina A.Y., Tarov D.V., Tatarinov P/S., Bebikhov Yu.V., Semenov A.S., Korznikova E.A., Dmitriev S.V. (2025). Review of recent work on electric pulse treatment of steels to improve their properties. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 22(3), 342-358. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.03.010.

### Введение

Благодаря своим механическим и физическим свойствам стали нашли широкое применение в различных отраслях промышленности:

машиностроении, нефтегазовой промышленности, судостроении, авиастроении и т.д. Эти свойства напрямую зависят от микроструктурных характеристик, таких как размер зерен, фазовый состав, текстура, дефекты и т.д. Для

управления микроструктурой металлов часто применяется термомеханическая обработка. Однако возникновение высоких термических и механических напряжений при такой обработке может привести к появлению дефектов в материале или вызвать нежелательные изменения структуры [1]. Устранение таких дефектов и гомогенизация микроструктуры – трудоемкие процессы [2], которых можно было бы избежать, если получить возможность воздействия на дефекты без излишнего нагрева в течении продолжительного времени.

Кроме того, на работоспособность изделия из металла также могут влиять микротрещины, образовавшиеся во время его эксплуатации. Микротрещины могут вырасти в размерах до макротрещин и привести к разрушению конструкции [3]. Для залечивания трещин также применяются методы термомеханической обработки [4]. Однако эти методы могут вызвать нежелательные структурные переходы и фазовые превращения, приводящие к ухудшению свойств материала. Вне зависимости от назначения термомеханическая обработка является трудоемким, энергозатратным и длительным процессом, поэтому перспективно найти альтернативный способ улучшения свойств металла и залечивания дефектов.

Одним из таких альтернативных способов является электроимпульсная обработка (ЭИО) металлов. Методы ЭИО стали активно разрабатываться после открытия Троицким электропластического эффекта (ЭПЭ) во время испытаний на растяжение монокристаллов цинка при воздействии одиночными импульсами тока [5]. Он обнаружил, что воздействие импульсного тока во время деформации металла способствует повышению его пластичности и снижению напряжений течения. В дальнейшем исследования ЭПЭ продолжались Троицким и другими советскими [6,7] и зарубежными исследователями [7,8]. Можно выделить несколько целей применения ЭИО для сталей: 1) повышение энергоэффективности процессов обработки давлением (волочения [10-12], прокатки [13-15] и т.д.) за счет повышения пластичности стали; 2) модификация микроструктуры [16,17]; 3) снижение остаточных напряжений, 4) повышение усталостной долговечности и залечивание усталостных трещин [18-21]; 5) повышение износостойкости [22,23], 6) повышение коррозионной стойкости [24].

Физическая природа ЭПЭ до сих пор не до конца изучена. Чаще всего ЭПЭ объясняют эффектами, которые можно разделить на тепловые и атермические [25]. Основным тепловым эффектом является выделение тепла в проводнике, по которому течет электрический ток, согласно закону Джоуля-Ленца. К тепловым эффектам также можно отнести неоднородное выделение джоулева тепла в результате взаимодействия электронов проводимости с ионами [26,27], которое протекает преимущественно на дефектах структуры в связи с их более высоким электросопротивлением. Далее тепло, выделившееся на дефектах, например, на дислокациях, рассеивается в бездефектную область кристаллической решетки, повышая их подвижность и, соответственно, пластичность материала [28-30]. Другой тепловой эффект проявляется при залечивании трещин и заключается в локальном нагреве области вблизи вершины трещины из-за того, что там концентрируется электрическое поле [31]. В этих условиях в материале вблизи вершины трещины выделяется больше тепла из-за более высокой плотности тока по сравнению с остальным образцом. Это приводит к тепловому расширению металла, его размягчению и локальному расплавлению. Далее, благодаря сжимающим механическим напряжениям, происходит сближение краев трещины и заваривание пространства между ее берегами [32]. К атермическим эффектам можно отнести действие электронного ветра, взаимодействие дислокаций с локальными стопами, скин-эффект, вибрацию [33]. К эффектам, возникающим в результате образования в подвергнутому воздействию импульсного электрического тока материале магнитного поля (так называемый эффект магнитопластичности), относятся пинч-эффект и спиновое разупрочнение металла [34].

Цель данной статьи - обобщение и анализ современных работ в области электроимпульсной обработки сталей.

## 1. Электростимулированная обработка давлением

В работе [35] провели глубокую вытяжку пластин из высокопрочной стали с помощью волоочильной матрицы с электроприводом. Джоулево тепло, выделявшееся в образце в результате воздействия электрического тока, симметрично распределялось по центру круг-

лого листа и практически не влияло на температуру образца и его микроструктуру. При этом воздействие электрического тока способствовало повышению микротвердости заготовки.

В работе [13] малоуглеродистая мартенситная сталь AISI1010 после закалки была подвергнута холодной прокатке и электростимулированной прокатке при разных режимах. Образцы после электростимулированной прокатки продемонстрировали меньшие микротвердость, предел текучести и предел прочности при растяжении, но значительно большее относительное удлинение по сравнению с образцами после холодной прокатки. При этом морфология структуры при холодной прокатке и электростимулированной прокатке была практически одинакова.

Почивалов в работе [14] исследовал микроструктуру и механические свойства низколегированной стали 10Г2ФБЮ после прокатки в плоских и рельефных валках в условиях обычной и электропластической деформации. При этом отмечалось возрастание предела прочности исследуемой стали при снижении пластичности прокатанного материала. Сталь после прокатки в рельефных валках в условиях электропластичности продемонстрировала максимальные предел текучести  $\sigma_{0.2}$  (905 МПа), предел упругости  $\sigma_0$  (511 МПа) и предел прочности  $\sigma_b$  (1024 МПа), но меньшее относительное удлинение (5 %). Образцы после прокатки в рельефных и плоских валках без электропластической деформации демонстрировали большее относительное удлинение (6.8 и 7.5 %), но меньшие прочностные свойства ( $\sigma_{0.2} = 540$  и 502 МПа,  $\sigma_0 = 321$  и 307 МПа,  $\sigma_b = 938$  и 934 МПа, соответственно). При этом максимальное относительное удлинение (8.3 %) и минимальные предел текучести  $\sigma_{0.2}$  (423 МПа) и предел упругости  $\sigma_0$  (278 МПа) достигались при прокатке в плоских валках в условиях электропластической деформации. Однако предел прочности  $\sigma_b$  (958 МПа) в этом случае был выше, чем при прокатке в обычных условиях. Структурные металлографические и электронно-микроскопические исследования показали, что повышение прочности стали при прокатке в рельефных валках в условиях электропластического эффекта обусловлены измельчением зерен феррита до размеров менее 0,5 мкм. Для образцов, прокатанных в рельефных валках, было характерно хрупкое разрушение.

## 2. Изменение микроструктуры и механических свойств стали после электроимпульсной обработки

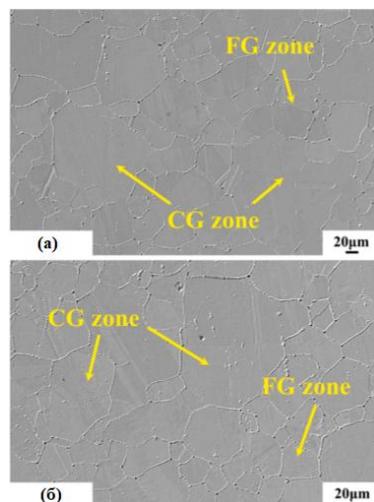
ЭИО может вызывать различные изменения микроструктуры сталей, включая изменение размера зерна, структуры границ зерен, фазовые превращения, размножение дефектов, рекристаллизацию, изменение текстуры, перераспределение внутренних напряжений и деформаций. Как следствие, ЭИО также оказывает влияние на механические свойства материала.

### 2.1 Размеры зерен, границы зерен и рекристаллизация

В работе Ли и соавторов [36] проводилась кратковременная ЭИО термообработанной на твердый раствор аустенитной нержавеющей стали, содержащей Cu, с целью достижения оптимальных прочности и пластичности материала. После ЭИО образцы подвергались термообработке в печи при температуре, равной максимальной температуре в центре образца при воздействии электрического тока. Микроструктура образцов после ЭИО была гетерогенной. Неравномерное выделение джоулева тепла во время ЭИО способствовало локальному росту размера зерна, в результате чего образовалась бимодальная зеренная структура, состоящая из мелких зерен, окружающих крупные зерна. Микрофотографии образцов после ЭИО, сделанные на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ), показаны на рис. 1.

В областях с мелкими зернами наблюдались случайные текстуры, в то время как крупным зернам соответствовала более плотная текстура. Количество текстур типа S {123} <634> <634> значительно увеличилось, и их доля достигла 30,1 %. Также присутствовало некоторое количество текстур типа латуни {110} <112> и меди {112} <111>. Что касается механических свойств, ЭИО способствовала повышению предела прочности на растяжение, предела текучести и относительного удлинения на 11.8, 35.9 и 10.2 %, соответственно, по сравнению с образцами после термообработки на твердый раствор при плотности тока 48 А/мм<sup>2</sup>, в то время как образцы после обработки при плотности тока 97.3 А/мм<sup>2</sup> демонстрировали практически такие же предел прочности и предел текучести, но меньшее относительное удлинение. Авторы работы считают, что их ре-

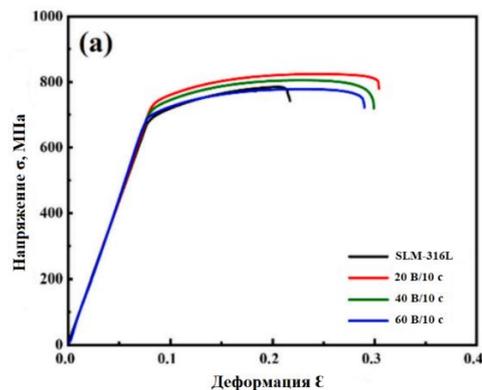
зультаты могут быть использованы при деформации биомедицинских металлических материалов.



**Рис. 1.** СЭМ-изображения бимодальной микроструктуры нержавеющей аустенитной стали, содержащей Cu, после электроимпульсной обработки при плотности тока (а) 48 А/мм<sup>2</sup>, (б) 97.3 А/мм<sup>2</sup>. CG zone – область с крупными зёрнами, FG zone – область с мелкими зёрнами [36].

**Fig. 1.** SEM images of the bimodal microstructure of Cu-bearing austenitic stainless steel after electric pulse treatment at a current density of (a) 48 A/mm<sup>2</sup>, (b) 97.3 A/mm<sup>2</sup>. CG zone is the area with coarse grains, FG zone is the area with fine grains [36].

Авторами работы [37] было проведено улучшение свойств нержавеющей стали, полученной методом селективного лазерного плавления (SLM-316L), при помощи ЭИО. ЭИО с режимом 20 В/10 с способствовала измельчению зёрен за счет воздействия электронного ветра и неравномерного джоулевого нагрева. При этом обработка при режиме 60 В/10 с, наоборот, способствовала росту зёрна. В начале ЭИО воздействие электрического тока приводило к растяжению и деформированию дислокационной сетки, в результате чего большеугловые границы зёрен преобразовывались в малоугловые. Главным механизмом ЭПЭ являлось действие электронного ветра. При увеличении напряжения главным механизмом ЭПЭ становился джоулев нагрев. Джоулево тепло накапливалось до определенной степени и вызывало рост зёрен. Наилучшие механические свойства продемонстрировал образец после ЭИО при режиме 20 В/10 сек, что видно из рис. 2.



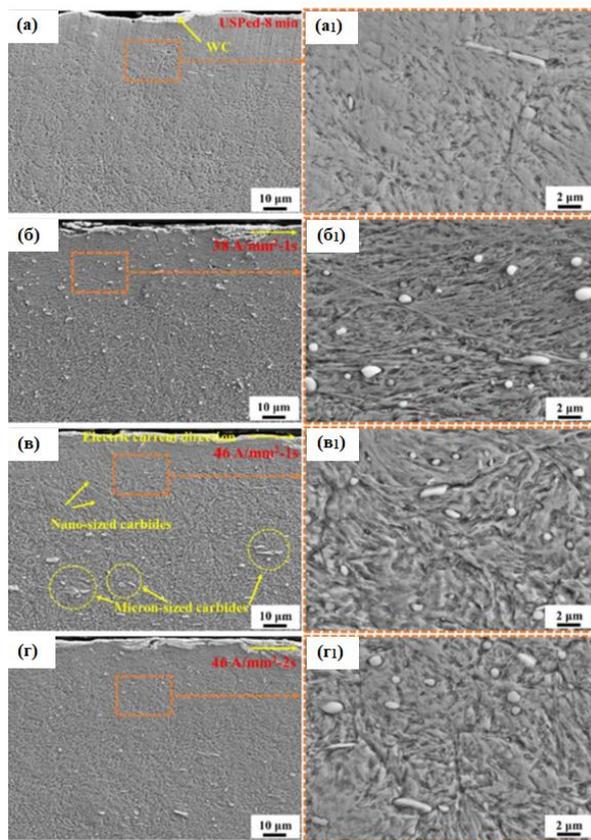
**Рис. 2.** Кривые растяжения стали SLM-316L после разных режимов электроимпульсной обработки [37].

**Fig. 2.** Tensile curve of SLM-316L steel after electric pulse treatment [37].

Юэ и соавторы [38] обнаружили, что под воздействием электрических импульсов неравновесные и высокоугловые границы зёрен в градиентной наноструктурной стали М50, действующие как активные центры, ускоряют процесс рекристаллизации в стали. Атермический эффект, вызванный воздействием электрического тока, способствует миграции субзёренных границ и поглощает окружающие дислокации, благодаря чему происходит статическая рекристаллизация.

## 2.2 Выделение/растворение частиц

В работе [39] проводили ЭИО градиентной наноструктурированной подшипниковой стали М50, ранее подвергнутой ультразвуковой дробеструйной обработке, с целью изучения ее влияния на процесс разложения карбидов. На рис. 3 представлены микроструктуры стали.



**Рис. 3.** Микроструктура стали M50 после (а, а<sub>1</sub>) ультразвуковой дробеструйной обработки и электроимпульсной обработки при режимах: (б, б<sub>1</sub>) 38 А/мм<sup>2</sup>-1 с, (в, в<sub>1</sub>) 46 А/мм<sup>2</sup>-1 с, (г, г<sub>1</sub>) 46 А/мм<sup>2</sup>-2 с [39].

**Fig. 3.** Microstructure of M50 steel after (a, a<sub>1</sub>) ultrasonic shot peening treatment and electric pulse treatment with parameters: (b, b<sub>1</sub>) 38 A/mm<sup>2</sup>-1 s, (c, c<sub>1</sub>) 46 A/mm<sup>2</sup>-1 s, and (d, d<sub>1</sub>) 46 A/mm<sup>2</sup>-2 s [39].

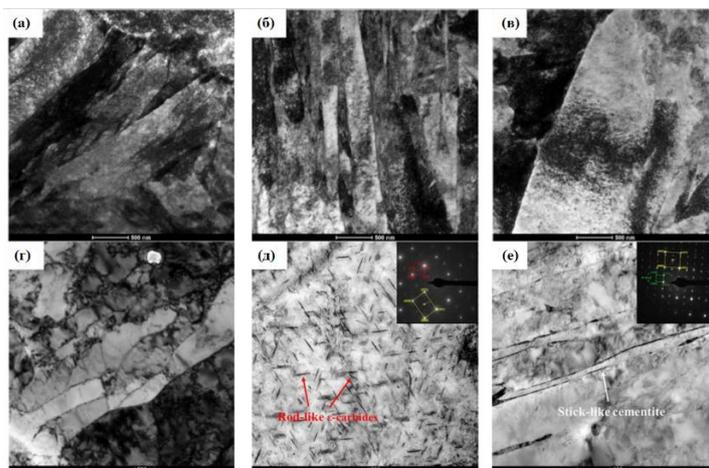
ЭИО привела к образованию дефектов упаковки, винтовых дислокаций и повёрнутых структур в карбидах. Плотность неравновесных границ зерен/дислокационные стенки увеличивались с увеличением интенсивности воздействия электрическими импульсами. Кроме того, атермическое воздействие электрических импульсов повысило эффективность диффузии легирующих элементов. В результате воздействия импульсного тока частицы карбидов неправильной формы были преобразованы в кар-

биды более округлой сферической формы, что, согласно предположениям авторов, оказывает положительное влияние на износостойкость и усталостную долговечность стали.

В работе [40] исследовали влияние импульсных токов на осаждение фосфидов при плавлении и кристаллизации нержавеющей стали 304. ЭИО подавляла рост фосфидов из-за разницы между электропроводностью расплавленной стали и фосфидов во время кристаллизации. С возрастанием плотности электрического тока размер фосфидов уменьшался.

В работе [41] исследовали влияние ЭИО на двумерную и трехмерную морфологию, распределение, количество и размер выделений MnS в высокосернистой микролегированной стали 49MnVS3. После применения импульса электрического тока с пиковым импульсным напряжением 30 В микроструктура была улучшена за счет увеличения скорости образования зародышей частиц в жидкой стали. Более того, по сравнению с необработанной сталью со сферическими частицами MnS, распределенными в матрице случайным образом, при ЭИО выделения MnS агрегировали преимущественно на нижней и верхней поверхностях слитка. В образце после ЭИО количество частиц MnS малого размера уменьшилось, а количество частиц большого размера увеличилось.

Чжан и соавторы в работе [42] применяли ЭИО с целью усиления упрочняющего эффекта легирующих элементов и достижения оптимального баланса прочности и пластичности высокопрочной низколегированной мартенситной стали. ЭИО при плотности тока 19.52 А/мм<sup>2</sup> в течение 10 с способствовала снижению остаточных напряжений в закаленной стали и повышению относительного удлинения с 4,5% до 12,4% без снижения прочности. Кроме того, воздействие электрического тока способствовало выделению мелких игольчатых ε-карбидов и мелких сферических карбидов M<sub>6</sub>C. На рис. 4. показаны изображения структуры, полученные с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ). Авторы считают, что ЭИО стали можно использовать в качестве альтернативы традиционным способам термообработки.



**Рис. 4.** ПЭМ-изображения низколегированной мартенситной стали (а) в закаленном состоянии без электроимпульсной обработки и после электроимпульсной обработки с плотностью тока (б) 12.3 А/мм<sup>2</sup>, (в) 19.52 А/мм<sup>2</sup>, (г) 27.76 А/мм<sup>2</sup>; выделения (карбиды) в образцах после электроимпульсной обработки с плотностью тока (д) 19.52 А/мм<sup>2</sup>, (е) 27.76 А/мм<sup>2</sup> [42].

**Fig. 4.** TEM images of low-alloy martensitic steel (a) in the quenched state without electric pulse treatment and after electric pulse treatment with a current density of (b) 12.3 A/mm<sup>2</sup>, (c) 19.52 A/mm<sup>2</sup>, (d) 27.76 A/mm<sup>2</sup>; precipitates (carbides) in samples after electric pulse treatment with a current density of (d) 19.52 A/mm<sup>2</sup>, (e) 27.76 A/mm<sup>2</sup> [42].

Ванг и соавторы [43] применяли ЭИО для растворения первичных карбидов в подшипниковой стали 8Cr4Mo4V. ЭИО снижала термодинамические барьеры для растворения первичных карбидов и улучшала кинетику диффузии элементов. Из-за несбалансированной диффузии Сг и Fe во время растворения карбидов в структуре образовывались поры Киркендалла. Из-за разницы в электропроводности между порами и матрицей в результате воздействия тока в порах образовывалось термическое сжимающее напряжение, способствующее быстрой миграции атомов в эти поры и их залечиванию. Таким образом, применяемая в данной работе технология может использоваться не только для растворения карбидов, но и для залечивания пор, образовавшихся в результате их растворения.

В работе [44] было исследовано влияние импульсного тока на количество, размер и распределение включений глинозема в стали SWRCH22A в расплавленном состоянии. В образце, подвергнутом воздействию тока, количество мелких включений глинозема возросло, однако их размер был значительно меньше, чем в образце, который не подвергался ЭИО.

Ванг и соавторы [45] исследовали влияние режима ЭИО на процесс растворения карбидов в подшипниковой стали GCr15 при помощи

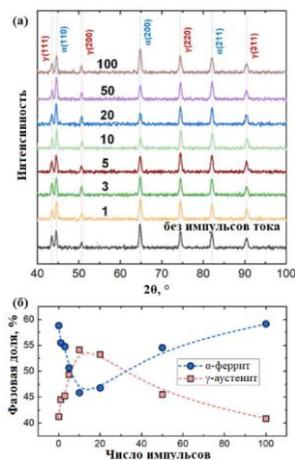
машинного обучения. Было обнаружено, что наибольшее влияние на растворение карбидов оказывает плотность тока, а наименьшее – скважность.

### 2.3 Фазовый состав и фазовые превращения

Ли с соавторами [46] проводили кратковременную ЭИО аустенитно-ферритной нержавеющей стали 2205 после прокатки. Обработка током плотностью 19,5 А/мм<sup>2</sup> способствовала повышению предела прочности на растяжение на 36 МПа и относительного удлинения на 5,7% по сравнению с исходным прокатанным образцом. Сравнительный анализ с изотермическим отжигом, проведенным при эквивалентной температуре и продолжительности, показал, что процесс модификации структуры при воздействии импульсных токов обусловлен не одним тепловым эффектом, а взаимодействием тепловых и атермических эффектов. ЭИО способствовала диссоциации дислокаций, зарождению рекристаллизации, что привело к образованию двойников и измельчению зерен. Кроме того, ЭИО привела к сегрегации легирующих элементов, стабилизирующих аустенит (Mn и Ni), что привело к изменению фазового состава стали. При плотности тока 19,5 А/мм<sup>2</sup> содержание аустенитной фазы в стали увеличи-

валось, а ферритной – уменьшалось. Соотношение аустенитной и ферритной фаз при этом режиме составило 1:1.05.

В работе [47] исследовали влияние ЭИО на диффузию легирующих элементов и микроструктуру двухфазной нержавеющей стали NSSC2120. После 20 импульсов тока с плотностью тока  $700 \text{ А/мм}^2$  в течение 8 мс материал продемонстрировал увеличение пластичности на 27% и прочности на 8%. ЭИО способствовала диффузии легирующих элементов, в частности, стабилизирующих аустенит элементов, таких как Mn и Ni, которые сыграли решающую роль в запуске фазового превращения между ферритом и аустенитом в материале. Воздействие импульсного тока при пластической деформации усиливало трип-эффект благодаря пониженной стабильности аустенита и более низкому содержанию стабилизирующих аустенит элементов, что и привело к одновременному улучшению как прочности, так и пластичности. На рис. 5 представлена рентгеновская дифрактограмма образца в исходном состоянии и после ЭИО и зависимость фазовой доли феррита и аустенита от числа импульсов тока.



**Рис. 5.** Кристаллографический анализ стали NSSC2120 с помощью рентгеновской дифракции. (а) Рентгеновская дифрактограмма образца в исходном состоянии и после электроимпульсной обработки, (б) зависимость фазовой доли  $\alpha$ -феррита и  $\gamma$ -аустенита от числа импульсов тока [47].

**Fig. 5.** Crystallographic analysis of NSSC2120 steel using X-ray diffraction. (a) X-ray diffraction pattern of the sample in the initial state and after electric pulse treatment, (b) dependence of the phase fraction of  $\alpha$ -ferrite and  $\gamma$ -austenite on the number of current pulses [47].

Ху и соавторы [48] провели ЭИО отожженной среднелегированной стали. Авторы обнаружили, что обработка при плотности тока  $15 \text{ А/мм}^2$  способствовала значительному превращению некоторых крупных зерен аустенита в мартенсит ( $\alpha'$ ) вместе с разделением углерода в оставшийся аустенит, что напоминает закалку и разделение. Такое превращение мартенсита объясняется атермическим эффектом импульсного тока, который может повысить точку  $M_s$  аустенита до температуры выше, чем повышение температуры, вызванное джоулевым теплом. Данный эффект способствовал измельчению зерен аустенита и повышению их механической стабильности. Более того, воздействие тока также привело как к уменьшению количества границ раздела феррит( $\alpha$ )/аустенит( $\gamma$ ), так и к образованию геометрически необходимых дислокаций вблизи границ раздела  $\alpha/\alpha'$  и  $\gamma/\alpha'$ . Следовательно, образцы, подвергнутые ЭИО, продемонстрировали более выраженное деформационное упрочнение с подавленной локализацией деформации, чем образцы, не обработанные импульсным током.

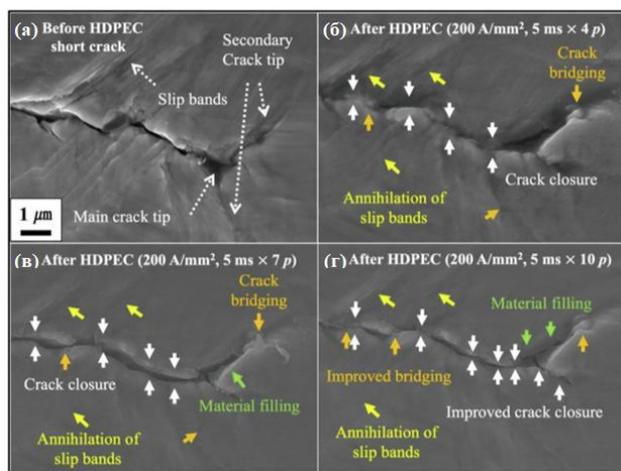
### 3. Снижение остаточных напряжений

В работе [49] проводили обработку током низкой плотности высокоуглеродистой стали с целью снижения остаточных напряжений за счет выделения карбидов. ЭИО показала большую эффективность при снижении остаточных напряжений в стали по сравнению с термообработкой, так как она способствовала диффузии атомов углерода и ускорению движения дислокаций. Выделение карбидов приводило к уменьшению содержания углерода в матрице и усадке кристаллической решетки, что снижало остаточные растягивающие напряжения.

### 4. Залечивание дефектов и повышение усталостной долговечности

В работе [50] проводили залечивание усталостных трещин в образцах из нержавеющей аустенитной стали типа 316 с помощью ЭИО. Был предложен метод улучшения эффективности залечивания трещин за счет контроля повышения температуры в вершине трещины в результате джоулева нагрева при многократном воздействии импульсных токов высокой плотности. В результате ЭИО произошло залечивание трещины с ее перекрытием, аннигиляция полос скольжения и заполнение расплавленным

материалом вершины трещины. Эти особенности вблизи вершины трещины можно рассматривать как совместное воздействие сжимающего напряжения вследствие джоулева нагрева и движения дислокаций, вызванного действием электронного ветра. Тепловое сжимающее напряжение вызывает закрытие трещины с образованием перемычек, в то время как действие электронного ветра играет значительную роль в гомогенизации полос скольжения и заполнении материала. Было обнаружено, что ЭИО, с использованными в данной работе режимами, более эффективна для залечивания коротких трещин, чем длинных и что для замедления роста усталостной трещины необходимо проводить ЭИО на ранней стадии распространения трещины. Микрофотографии трещины, сделанные на полевом эмиссионном сканирующем микроскопе, представлены на рис. 6.



**Рис. 6.** Залечивание усталостной трещины в стали 316. До электроимпульсной обработки (а) и после электроимпульсной обработки при режимах 200 А/мм<sup>2</sup> и 5 мс при (б) 4 импульсах тока (в) 7 импульсах тока (г) 10 импульсов тока [50].

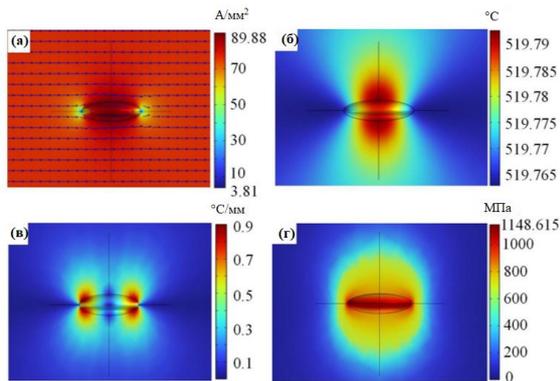
**Fig. 6.** Fatigue crack healing in 316 steel. Before (a) and after electric pulse treatment at 200 A/mm<sup>2</sup> and 5 ms with (b) 4 current pulses (c) 7 current pulses (d) 10 current pulses [50].

Кукуджанов и др. в работе [51] проводили залечивание импульсными токами высокой плотности выращенных в лабораторных условиях усталостных макротрещин в нержавеющей стали 12Х15Г9НД. ЭИО позволила залечить часть трещины длиной 520 мкм, что составляло около 9 % от длины первоначальной трещины (5750 мкм). На последнем этапе воздействия импульсным током произошло обра-

зование кратера. Анализ микроструктуры показал, что залечивание макротрещин происходило по механизму заварки краев трещин расплавленным металлом, подвергшимся воздействию высоких температур и сжимающих механических напряжений.

В работе [52] проводили залечивание усталостных трещин в нержавеющей стали 316 с помощью импульсов тока и моделирование процесса закрытия трещин при ЭИО с помощью метода конечных элементов. По результатам моделирования и эксперимента было установлено, что усталостные трещины могут быть полностью залечены при ЭИО с увеличенной длительностью (например, 200 мс) и высокой плотностью тока (например, 10<sup>6</sup>-10<sup>8</sup> А/м<sup>2</sup>). Подробный микроструктурный анализ залеченной области выявил полное сцепление между поверхностями трещин без микропустот, характеризующееся узкой полосой (шириной <100 мкм) с мелкими рекристаллизованными зернами. Наблюдаемая миграция границ, захват полостей внутри зерен и частичное выравнивание дислокационных субструктур по исходной трещине подтверждают твердофазную диффузионную связь, ответственную за залечивание материала. Предел текучести, пластичность и усталостная долговечность залеченного материала могут быть в дальнейшем значительно улучшены до уровня исходного материала с помощью одноэтапной термообработки.

Ванг и соавторы [53] применяли несколько циклов ЭИО для залечивания пор в мартенситной стали 18Ni300, изготовленной с помощью аддитивной технологии (лазерной плавки в порошковой среде). 10 циклов ЭИО током высокой плотности и короткой длительности способствовали повышению прочности на разрыв с 1200 до 1600 МПа и уменьшению пористости с 0.087 до 0.023%. Также было проведено мультифизическое моделирование процесса залечивания пор при ЭИО с помощью COMSOL. Контурные карты различных физических параметров вокруг поры при ЭИО представлены на рис. 7.



**Рис. 7.** Контурные карты мультифизического моделирования области вокруг поры при электроимпульсной обработке, распределение (а) плотности электрического тока, (б) температуры, (в) градиента температуры, (г) термических напряжений [53].

**Fig. 7.** Contour maps of multiphysical modeling of the area around a pore during electric pulse treatment, distribution of (a) electric current density, (b) temperature, (c) temperature gradient, (d) thermal stresses [53].

Согласно результатам моделирования поры, имеющие меньшее соотношение ширины и длины, демонстрировали более выраженную концентрацию электрического тока на краю поры, что приводило к неоднородному распределению плотности электрического тока. Эта неоднородность инициировала возникновение градиента температуры и вызывала образование значительных термических напряжений и пластической деформации, которые облегчали процесс закрытия пор.

Щипачев и др. [54] успешно провели заливку дефектов несплошности образцов из стали 17Г1С, вырезанных из магистральных трубопроводов, с помощью магнитно-импульсной обработкой токами Фуко.

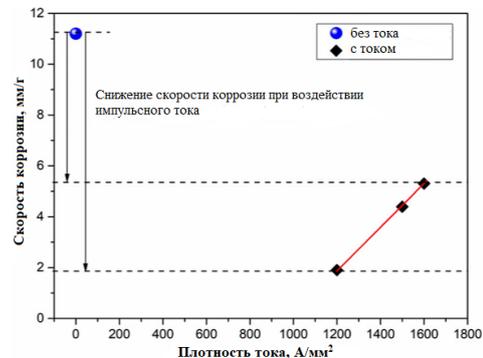
### 5. Износостойкость

В работе [55] исследовали влияние электромагнитной обработки на износостойкость стали М50, обработанной ультразвуковым дробеструйным упрочнением. Износостойкость стали после электромагнитной обработки возросла на 15.7 %.

### 6. Коррозионная стойкость

В работе [24] исследовали коррозионную стойкость углеродистой стали 30MnSi после

ЭИО. Испытания на погружение (рис. 8) и электрохимический анализ показали, что коррозионная стойкость стали после воздействия импульсного тока возросла.

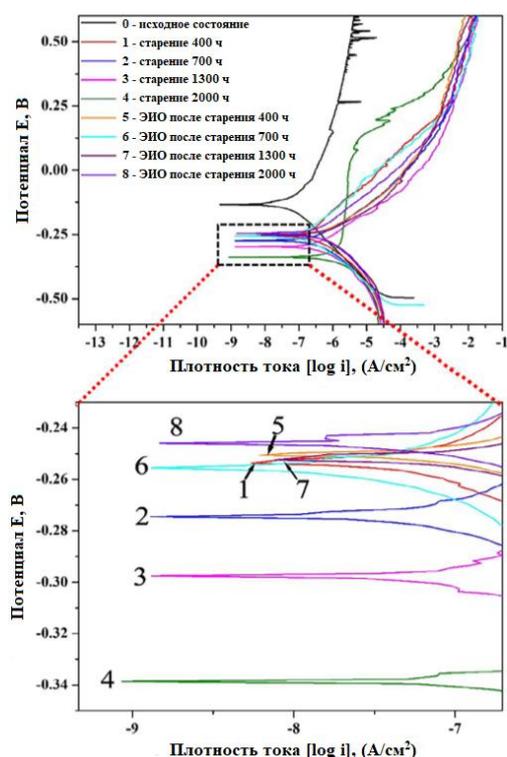


**Рис. 8.** Скорость коррозии стали 30MnSi при воздействии импульсного тока по результатам испытания на погружение в раствор, имитирующий морскую воду [24].

**Fig. 8.** Corrosion rate of 30MnSi steel under the influence of pulsed current according to the results of immersion test in the simulated sea-water solution [24].

Снижение скорости коррозии в стали связано с уменьшением фазовой доли перлита при воздействии импульсного тока в связи с меньшей электропроводностью перлита. Отметим, что питтинговая коррозия часто инициируется гальванической коррозией между ферритом и цементитом, являющимися составными частями перлита. Соответственно, уменьшение доли перлита приводило к повышению коррозионной стойкости металла. При этом потенциал коррозии уменьшался при увеличении плотности импульсного тока, что свидетельствует о том, что при повышении импульса тока коррозионная стойкость стали снижалась. Авторы отмечают, что актуальным направлением применения ЭИО является повышение коррозионной стойкости труб для нефтяных трубопроводов.

Чэн и Чжан [56] исследовали влияние импульсных токов на коррозионную стойкость аустенитной нержавеющей стали 316LN, состаренной при 650 °C в течение 2000 ч. На рис. 9 представлены поляризационные кривые образцов после ЭИО.



**Рис. 9.** Потенциодинамические поляризационные кривые образцов после старения и электроимпульсной обработки [56].

**Fig. 9.** Potentiodynamic polarization curves of samples after aging and electric pulse treatment [55].

В табл. 1 представлены потенциал коррозии и плотность тока коррозии образцов при различных условиях старения и ЭИО.

**Таблица 1.** Потенциал коррозии и плотность тока коррозии образцов при различных условиях обработки [55].

**Table 1.** Corrosion potential and corrosion current density of samples under different treatment conditions [55].

Образец	Потенциал коррозии, мВ	Плотность тока коррозии, мкА/см <sup>2</sup>	Скорость коррозии, мкм/г
0	-134	0.12	1.3
1	-254	0.19	2.2
2	-278	0.29	3.3
3	-298	0.43	4.9
4	-339	1.10	12.3
5	-251	0.17	2.0
6	-255	0.23	2.6
7	-252	0.20	2.3
8	-246	0.16	1.9

ЭИО привела к растворению выделившихся при высокой температуре частиц, отрицательно влияющих на коррозионную стойкость стали, в связи с разницей между электропроводностью этих частиц и матрицы. Испытание на погружение и электрохимический анализ показали, что ЭИО способствовала повышению устойчивости стали к межкристаллитной коррозии и электрохимической коррозии, что подтверждает эффективность этой методики в качестве альтернативы термообработке (отжигу).

### Заключение

Как видно из обзора, ЭИО сталей до сих пор вызывает интерес у ученых не только России, но и мира. В современных исследованиях ЭИО сталей используется для облегчения процессов обработки давлением, улучшения микроструктуры, снижения остаточных напряжений, залечивания усталостных трещин и других дефектов, повышения износостойкости и повышения коррозионной стойкости. В качестве областей применения ЭИО авторы выделяют биомедицину, нефтяную промышленность и многие другие. Среди новых достижений в изучении ЭИО можно выделить использование ЭИО для улучшения сталей, произведенных аддитивными методами, применение метода конечных элементов для изучения ЭПЭ и применение машинного обучения для прогнозирования воздействия импульсного тока на металл, а также открытие различных механизмов и закономерностей эволюции структуры стали при ЭИО.

### Список литературы

1. Yu J., Sun X., Zhao N., Jin T., Guan H., Hu Z. Effect of heat treatment on microstructure and stress rupture life of DD32 single crystal Ni-base superalloy // Mater. Sci. Eng. A. 2007. V. 460-461. P. 420-427.
2. Liu J., Wei C., Yang G., Wang L., Wang L., Wu X., et al. A novel combined electromagnetic treatment on cemented carbides for improved milling and mechanical performances // Metall Mater. Trans. A. 2018. V. 49. P. 4798-4808.
3. Аксенов Д.А., Рааб Г.И., Асфандияров Р.Н., Пейкин Л., Сюэюань Ч. Структурные изменения в сплаве системы Cu-Ni-Si после РКУП при разной температуре // Materials. Technologies. Design. 2021. Т. 3, № 4(6). С. 5-10.

4. Wei D.B., Han J.T., Tieu A.K., Jiang Z.Y. An Analysis on the Inhomogeneous Microstructure in Crack Healing Area // *KEM*. 2004. V. 274–276. P. 1053–1058.
5. O. A. Troitskii. Electromechanical effect in metals // *JETP Letters*. 1969. V. 10. P. 18–22.
6. Зуев Л.Б., Громов В.Е., Курилов В.Ф., Гуревич Л.И. Подвижность дислокаций в монокристаллах цинка при действии импульсов тока // *Д. АН СССР*. 1978. Т. 239, № 1. С. 84–87.
7. Troitskii O.A., Spitsyn V.I., Sokolov N.V., Ryzhkov V.G. Electroplastic drawing of stainless steels // *Dokl. Akad. Nauk*. 1977. V. 237. P. 1082.
8. Conrad H., Sprecher A.F. Dislocations in Solids // *Elsevir Sci. Publ*. 1989. P. 499–539.
9. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. A study of the electroplastic effect in metals // *Scripta Metallurgica*. 1978. V. 12, № 11, P. 1063–1068.
10. Громов В.Е., Кузнецов В.А., Ерилова Т.В., Перетяшко В.Н. Электростимулированное волочение проволоки из сталей марок Ст2кп и 08Г2С // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 1988. № 10. С. 63–67.
11. Tang G., Zhang J., Yan Y., Zhou H., Fang W. The engineering application of the electroplastic effect in the cold-drawing of stainless steel wire // *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. V. 137, № 1–3 SPEC. P. 96–99.
12. Yao K.-F., Wang J., Zheng M., Yu P., Zhang H. A research on electroplastic effects in wiredrawing process of an austenitic stainless steel // *Scripta Materialia*. 2001. V. 45, № 5. P. 533–539.
13. Qian L., Zhan L., Zhou B., Zhang X., Liu S., Lv Z. Effects of electroplastic rolling on mechanical properties and microstructure of low-carbon martensitic steel // *Materials Science and Engineering: A*. 2021. V. 812. P. 141144.
14. Почивалов Ю.И. Структура и свойства малолегированной стали 10Г2ФБЮ после прокатки в рельефных валках в условиях электропластичности // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2023. Т. 66, № 6. С. 659–665.
15. Троицкий О.А., Ким С. К., Стащенко В.И. Стан для прокатки нержавеющей стали без отжига с применением импульсного тока // *Станкоинструмент*. 2019. № 2 (15). С. 46–53.
16. Qian D., Wang R., Dong Z., Wang F. Microstructure evolution and wear resistance improvement of ultrasonic peened M50 steel via electromagnetic shocking // *Steel Res. Int*. 2023. V. 94, № 10. P. 2300067.
17. Pan D., Zhao Y., Wang Y., Xu X., Yin P., Chong X. Formation of ultrafine pearlites in tempered 42CrMo steel induced by electro-pulsing // *Mater Lett*. 2019. V. 251. P. 73–77.
18. Иванов Ю.Ф., Лычагин Д.В., Громов В.Е., Целлермаер В.В., Соснин О.В., Коваленко В.В., Коновалов С.В. Мезоскопическая субструктура и электроимпульсное подавление усталостного разрушения // *Физическая мезомеханика*. 2000. Т. 3, № 1. С. 103–108.
19. Иванов Ю.Ф., Соснин О.В., Воробьев С.В., Малиновская В.А., Козлов Э.В. Особенности усталостного разрушения нержавеющей аустенитной стали при импульсном токовом воздействии // *Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии*. 2007. № 20. С. 120–123.
20. Hosoi A., Nagahama T., Ju Y. Fatigue crack healing by a controlled high density electric current field // *Mater. Sci. Eng. A*. 2012. V. 533. P. 38–42.
21. Choi K.J., Yoo S.C., Ham J., Kim J.H., Jeong S.Y., Choi Y.S. Fatigue behavior of AISI 8620 steel exposed to magnetic field // *J. Alloy Compd*. 2018. V. 764. P. 73–79.
22. Баранов Ю.В. Особенности изменения физико-механических свойств и износостойкости быстрорежущих инструментальных сталей при обработке импульсным электрическим током // *Машиностроение и инженерное образование*. 2005. № 1 (2). С. 20–28.
23. Babutskyi A., Chrysanthou A., Zhao C. Effect of pulsed magnetic field pre-treatment of AISI 52100 steel on the coefficient of sliding friction and wear in pin-on-disk tests // *Friction*. 2014. V. 2, № 4. P. 310–316.
24. 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 Metall. Sin. (Engl. Lett.)* 2018. V.31. P. 1233–1239.
25. Lahiri A., Shanthraj P., Roters F. Understanding the mechanisms of electroplasticity from a crystal plasticity perspective // *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. 2019. V. 27. 085006.
26. Ragab T., Basaran C. Joule heating in single-walled carbon nanotubes // *J. Appl. Phys*. 2009. V. 106, № 6. 063705.
27. Zhao J., Wang G.-X., Dong Y., Ye C. Multiscale modeling of localized resistive heating in nanocrystalline metals subjected to electropulsing // *J. Appl. Phys*. 2017. V. 122, № 8. 085101.
28. 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. V. 1. P. 27–43.
29. Stolyarov V.V. Role of the pulse current duty cycle during titanium tension // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2023. V. 52, № 4. P. 313–319.

30. 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. V. 22, № 4. P. 615-632.
31. Финкель В.М., Головин Ю.И., Слетков А.А. О возможности торможения быстрых трещин импульсами тока // *Докл. АН СССР*. 1976. Т. 227, № 4. С. 848-851.
32. Брызгалов В.А., Моркина А.Ю., Абдуллина Д.У., Семенов А.С., Татаринов П.С., Якушев И.А., Бебихов Ю.В., Кукуджанов К.В., Корзникова Е.А., Дмитриев С.В. Обзор исследований по заживлению макротрещин в металлах под действием импульсного тока высокой плотности // *Materials. Technologies. Design*. 2024. Т. 6, № 2 (17). С. 38-58.
33. Xie L., Sun H., Wen Y., Hua L., Zhang L.-C. Electromagnetic treatment enhancing performance of metal materials: A review // *Progress in Materials Science*. 2025. V. 153. 101488.
34. Минько Д.В. Анализ перспектив применения электропластического эффекта в процессах обработки металлов давлением // *Литье и металлургия*. 2020. № 4. С. 125–130.
35. Lv Z., Zhou Y., Zhan L., Zang Z., Zhou B., Qin S. Electrically assisted deep drawing on highstrength steel sheet // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. V. 112, № 3-4, P. 763-773.
36. Li J., Hou S., Zhao G., Li H., Ma L. Synchronous improvement in strength and ductility of Cu-bearing stainless steels through formation of bimodal grain structure induced by short-time electric pulses // *Journal of Materials Processing Technology*. 2024. V. 332. 118554.
37. Chun-huan G., Zhe-ming F., Shu-bang W., Qian-fei S., Tao D., Feng-chun J. Effect of electropulsing treatment on microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting // *Materials Letters*. 2025. V. 382. 137905.
38. Yue X., Sun Q., Hu S., Yin F., Hua L. Understanding the recrystallization and phase transformation of gradient nanostructured M50 steel under the athermal effect of electrical pulses // *Materials Characterization*. 2023. V. 203. 113072.
39. Yue X., Hu S., Yin F., Hua L. Athermally induced MC carbide decomposition in gradient M50 bearing steels during electric pulse treatments // *J. Mater. Sci*. 2023. V. 58, № 38. P. 15251–15263.
40. Jia D., Zhong L., Yu J., Liu Z., Yuan L., Tian C., Zhou Y., Wang X. Effects of Electric Current Pulse Treatment on Phosphide Precipitation Behavior in 304 Stainless Steel // *Steel Research International*. 2023. V. 94, № 6. 2200692.
41. Ying G., Yang W., Wang W., Zeng J. Effect of electropulsing treatment on the precipitation behavior of MnS in sulfur-containing microalloyed 49MnVS3 steel // *Metallurgical Research and Technology*. 2023. V. 120, № 3. 317.
42. Zhang C., Luo X., Liu J., Zhou X., Tu Y. Flash Tempering of High-Strength, Low-Alloy Martensitic Steel via Electrical Pulsing Treatment // *Materials*. 2025. V. 18, № 1. 182.
43. Wang Z., Zhang T., Zhou M., Zhang M., Ma J., Zhang X., Guo J., Liu J., Zhou Y. Dissolution of Primary Carbides and Formation and Healing of Kirkendall Voids in Bearing Steel under Pulsed Electric Current // *Steel Research International*. 2025. V. 96, № 2. 2400400.
44. Yang X., Zhang L., Cao D., Han X., Zhang Y., He Z. Influence of Pulse Current on Inclusion Properties of Alumina in Molten Steel // *Metals*. 2022. V. 12, № 10. 1742.
45. Wang Z., Ren L., Zhang Y., Zhou M., Zhang X. Realizing Ultra-fast Spheroidization of GCr15 Bearing Steel by Analyzing the Correlation of Carbide Dissolution Law and Pulsed Electric Current Parameters Through Machine Learning // *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2025. V. 38. P. 1207-1218.
46. Hu B., Wen Q., Guo Q., Wang Y., Sui H., Luo H. A novel electric pulse pathway to suppress plastic localization and enhance strain hardening of medium Mn steel // *Scripta Materialia*. 2022, V. 221. 114991.
47. Gu S., Liu C., Kimura Y., Yoon S., Cui Y., Yan X., Ju Y., Toku Y. Realizing strength–ductility synergy in a lean duplex stainless steel through enhanced TRIP effect via pulsed electric current treatment // *Materials Science and Engineering: A*. 2023. V. 883. 145534.
48. Li, J., Han, C., Wang, R., Zhao, G., Li, H. Achieving Synergistic Enhancement of Strength Ductility in 2205 Duplex Steel via Short-Time Pulse Current // *Metals and Materials International*. 2025.
49. Yi K., Xiang S., Zhou M., Zhang X., Du F. Altering the Residual Stress in High-Carbon Steel through Promoted Dislocation Movement and Accelerated Carbon Diffusion by Pulsed Electric Current // *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2023. V. 36, № 9. P. 1511 – 1522.
50. Yoon S., Gu S., Li S., Kimura Y., Toku Y., Ju Y. Efficiency improvement of fatigue crack healing by multiple high-density pulsed electric currents: Application to austenitic stainless steel // *Engineering Fracture Mechanics*. 2023. V. 284. 109235.

51. 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, № 5. P. 3223 – 3234.

52. Telpande S., Kumar C., Sharma D., Kumar P. Electric current-induced solid-state crack healing and life extension // *Acta Materialia*. 2025. V. 283. 120573.

53. Wang J., Zhang S., Liu Z., Chen H., Liu D. Simultaneously Reducing Porosity and Strengthening the Additively Manufactured 18Ni300 Steel Through Cyclic Electropulsing Treatment // *Metals and Materials International*. 2025. 113064.

54. Schipachev A., Aljadly M., Ganzulenko O., Chernikov D., Razzhivin V., Yusupov R. Evaluating the Effectiveness of Magnetic-Pulse Treatment for Healing Continuity Defects in the Metal of Oil and Gas Pipelines // *Metals*. 2023. V. 13, № 11. P. 1875.

55. Qian D., Wang R., Dong Z., Wang F. Microstructure evolution and wear resistance improvement of ultrasonic peened M50 steel via electromagnetic shocking // *Steel Res. Int.* 2023. V. 94, № 10. 2300067.

56. 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, № 55. P. 1022-1029.

### Информация об авторах

*И.С. Свгоняко – аспирант, инженер Центра реверсивного инжиниринга Уфимского государственного нефтяного технического университета.*

*А.Ю. Моркина – инженер Центра реверсивного инжиниринга Уфимского государственного нефтяного технического университета, младший научный сотрудник молодежной лаборатории «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях» Уфимского университета науки и технологий, аспирант Института проблем сверхпластичности металлов РАН.*

*Д.В. Таров – инженер-исследователь молодежной лаборатории «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях» Уфимского университета науки и технологий.*

*П.С. Татаринев - старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика и автоматизация промышленного производства» Политехнического института (филиала) в г. Мирном, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова.*

*Ю.В. Бебихов – доктор физ.-мат. наук, доцент, зав. кафедрой «Электроэнергетика и*

*автоматизация промышленного производства» Политехнического института (филиала) в г. Мирном, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова.*

*А.С. Семенов – доктор физ.-мат. наук, доцент, директор Политехнического института (филиала) в г. Мирном, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова.*

*Е.А. Корзникова – доктор физ.-мат. наук, заведующий молодежной лаборатории «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях» Уфимского университета науки и технологий.*

*С.В. Дмитриев - доктор физ.-мат. наук, профессор УГНТУ, зав. лаб. Института физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН, г.н.с. ИПСМ РАН.*

### References

1. Yu J., Sun X., Zhao N., Jin T., Guan H., Hu Z. Effect of heat treatment on microstructure and stress rupture life of DD32 single crystal Ni-base superalloy // *Mater. Sci. Eng. A*. 2007. V. 460-461. P. 420–427.

2. Liu J., Wei C., Yang G., Wang L., Wang L., Wu X., et al. A novel combined electromagnetic treatment on cemented carbides for improved milling and mechanical performances // *Metall Mater. Trans. A*. 2018. V. 49. P. 4798–4808.

3. Aksenov D.A., Raab G.I., Asfandiyarov R.N., Peiqing La., Xuyuan Zh. Structural changes in the Cu-Ni-Si system alloy after ECAP at different temperatures // *Materials. Technologies. Design*. 2021. V. 3, № 4(6). P. 5–10 (in Russ.).

4. Wei D.B., Han J.T., Tieu A.K., Jiang Z.Y. An Analysis on the Inhomogeneous Microstructure in Crack Healing Area // *KEM*. 2004. V. 274–276. P. 1053– 1058.

5. O. A. Troitskii. Electromechanical effect in metals // *JETP Letters*. 1969. V. 10. P. 18–22.

6. Zuev L.B., Gromov V.E., Kurilov V.F., Gurevich L.I. Mobility of dislocations in zinc single crystals under the effect of current pulses // *D. AN SSSR*. 1978. V. 239, № 1. P. 84-87 (in Russ.).

7. Troitskii O.A., Spitsyn V.I., Sokolov N.V., Ryzhkov V.G. Electroplastic drawing of stainless steels // *Dokl. Akad. Nauk*. 1977. V. 237. P. 1082.

8. Conrad H., Sprecher A.F. Dislocations in Solids // *Elsevir Sci. Publ*. 1989. P. 499-539.

9. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. A study of the electroplastic effect in metals // *Scripta Metallurgica*. 1978. V. 12, № 11, P. 1063-1068.

10. Gromov V.E., Kuznetsov V.A., Erilova T.V., Peretyatko V.N. Elektrostimulirovannoye volocheniye provoloki iz staley marok St2kp i 08G2S // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavefeniy*.

- Chernaya metallurgiya. 1988. № 10. P. 63-67 (in Russ.).
11. Tang G., Zhang J., Yan Y., Zhou H., Fang W. The engineering application of the electroplastic effect in the cold-drawing of stainless steel wire // *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. V. 137, № 1-3 SPEC. P. 96-99.
  12. Yao K.-F., Wang J., Zheng M., Yu P., Zhang H. A research on electroplastic effects in wiredrawing process of an austenitic stainless steel // *Scripta Materialia*. 2001. V. 45, № 5. P. 533-539.
  13. Qian L., Zhan L., Zhou B., Zhang X., Liu S., Lv Z. Effects of electroplastic rolling on mechanical properties and microstructure of low-carbon martensitic steel // *Materials Science and Engineering: A*. 2021. V. 812. P. 141144.
  14. Pochivalov YU.I. Structure and properties of low-alloy steel 10G2FBYU after rolling in embossed rolls under conditions of electroplasticity // *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023. V. 66, № 6. P. 659-665 (in Russ.).
  15. Troitsky O., Kim S., Stashenko V. Stainless steel rolling mill without ancals with the use of pulse current // *Stankoinstrument*. 2019. № 2 (15). P. 46-53 (in Russ.).
  16. Qian D., Wang R., Dong Z., Wang F. Microstructure evolution and wear resistance improvement of ultrasonic peened M50 steel via electromagnetic shocking // *Steel Res. Int*. 2023. V. 94, № 10. P. 2300067.
  17. Pan D., Zhao Y., Wang Y., Xu X., Yin P., Chong X. Formation of ultrafine pearlites in tempered 42CrMo steel induced by electro-pulsing // *Mater Lett*. 2019. V. 251. P. 73-77.
  18. Ivanov Yu.F., Lychagin D.V., Gromov V.E., Tsellermaer V.V., Sosnin O.V., Kovalenko V.V., Konovalov S.V. Mesoscopic substructure and electroimpulse suppression of fatigue failure // *Physical mezomechanics*. 2000. V. 3, № 1. P. 103-108 (in Russ.).
  19. Ivanov Yu.F., Sosnin O.V., Vorobev S.V., Malinovskaya V.A., Kozlov E.V. Osobennosti ustalostnogo razrusheniya nerzhavayushchei austenitnoi stali pri impulsnom tokovom vozdeistvii // *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sektsii Rossiiskoi akademii yestestvennikh nauk. Otdelenie metallurgii*. 2007. № 20. P. 120-123 (in Russ.).
  20. Hosoi A., Nagahama T., Ju Y. Fatigue crack healing by a controlled high density electric current field // *Mater. Sci. Eng. A*. 2012. V. 533. P. 38-42.
  21. Choi K.J., Yoo S.C., Ham J., Kim J.H., Jeong S.Y., Choi Y.S. Fatigue behavior of AISI 8620 steel exposed to magnetic field // *J. Alloy Compd*. 2018. V. 764. P. 73-79.
  22. Baranov Yu.V. Osobennosti izmeneniya fiziko-mekhanicheskikh svoystv i iznosostoikosti bistrorezhushchikh instrumentalnykh staley pri obrabotke impulsnim elektricheskim tokom // *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie*. 2005. № 1 (2). P. 20-28 (in Russ.).
  23. Babutskiy A., Chrysanthou A., Zhao C. Effect of pulsed magnetic field pre-treatment of AISI 52100 steel on the coefficient of sliding friction and wear in pin-on-disk tests // *Friction*. 2014. V. 2, № 4. P. 310-316.
  24. 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 Metall. Sin. (Engl. Lett.)* 2018. V.31. P. 1233-1239.
  25. Lahiri A., Shanthraj P., Roters F. Understanding the mechanisms of electroplasticity from a crystal plasticity perspective // *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. 2019. V. 27. 085006.
  26. Ragab T., Basaran C. Joule heating in single-walled carbon nanotubes // *J. Appl. Phys*. 2009. V. 106, № 6. 063705.
  27. Zhao J., Wang G.-X., Dong Y., Ye C. Multiscale modeling of localized resistive heating in nanocrystalline metals subjected to electropulsing // *J. Appl. Phys*. 2017. V. 122, № 8. 085101.
  28. 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. V. 1. P. 27-43.
  29. Stolyarov V.V. Role of the pulse current duty cycle during titanium tension // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2023. V. 52, № 4. P. 313-319.
  30. 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. V. 22, № 4. P. 615-632.
  31. Finkel V.M., Golovin Yu.I., Sletkov A.A. O vozmozhnosti tormozheniya bistrikh treshchin impulsami toka // *Dokl. AN SSSR*. 1976. V. 227, № 4. P. 848-851 (in Russ.).
  32. Bryzgalov V.A., Morkina A.Yu., Abdullina D.U., Semenov A.S., Tatarinov P.S., Yakushev I.A., Bebikhov Yu.V., Kukudzhanov K.V., Korznikova E.A., Dmitriev S.V. High-density pulsed current: a review of its role in healing macrocracks in metals // *Materials. Technologies. Design*. 2024. V. 6, № 2 (17). P. 38-58 (in Russ.).
  33. Xie L., Sun H., Wen Y., Hua L., Zhang L.-C. Electromagnetic treatment enhancing performance of metal materials: A review //

- Progress in Materials Science. 2025. V. 153. 101488.
34. Minko D.V. Analysis of the prospects of the application of the electroplastic effect in the processes of processing metals with pressure // *Lit'ye i metallurgiya*. 2020. № 4. P. 125–130 (in Russ.).
35. Lv Z., Zhou Y., Zhan L., Zang Z., Zhou B., Qin S. Electrically assisted deep drawing on highstrength steel sheet // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. V. 112, № 3-4, P. 763-773.
36. Li J., Hou S., Zhao G., Li H., Ma L. Synchronous improvement in strength and ductility of Cu-bearing stainless steels through formation of bimodal grain structure induced by short-time electric pulses // *Journal of Materials Processing Technology*. 2024. V. 332. 118554.
37. Chun-huan G., Zhe-ming F., Shu-bang W., Qian-fei S., Tao D., Feng-chun J. Effect of electropulsing treatment on microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting // *Materials Letters*. 2025. V. 382. 137905.
38. Yue X., Sun Q., Hu S., Yin F., Hua L. Understanding the recrystallization and phase transformation of gradient nanostructured M50 steel under the athermal effect of electrical pulses // *Materials Characterization*. 2023. V. 203. 113072.
39. Yue X., Hu S., Yin F., Hua L. Athermally induced MC carbide decomposition in gradient M50 bearing steels during electric pulse treatments // *J. Mater. Sci*. 2023. V. 58, № 38. P. 15251–15263.
40. Jia D., Zhong L., Yu J., Liu Z., Yuan L., Tian C., Zhou Y., Wang X. Effects of Electric Current Pulse Treatment on Phosphide Precipitation Behavior in 304 Stainless Steel // *Steel Research International*. 2023. V. 94, № 6. 2200692.
41. Ying G., Yang W., Wang W., Zeng J. Effect of electropulsing treatment on the precipitation behavior of MnS in sulfur-containing microalloyed 49MnVS3 steel // *Metallurgical Research and Technology*. 2023. V. 120, № 3. 317.
42. Zhang C., Luo X., Liu J., Zhou X., Tu Y. Flash Tempering of High-Strength, Low-Alloy Martensitic Steel via Electrical Pulsing Treatment // *Materials*. 2025. V. 18, № 1. 182.
43. Wang Z., Zhang T., Zhou M., Zhang M., Ma J., Zhang X., Guo J., Liu J., Zhou Y. Dissolution of Primary Carbides and Formation and Healing of Kirkendall Voids in Bearing Steel under Pulsed Electric Current // *Steel Research International*. 2025. V. 96, № 2. 2400400.
44. Yang X., Zhang L., Cao D., Han X., Zhang Y., He Z. Influence of Pulse Current on Inclusion Properties of Alumina in Molten Steel // *Metals*. 2022. V. 12. № 10. 1742.
45. Wang Z., Ren L., Zhang Y., Zhou M., Zhang X. Realizing Ultra-fast Spheroidization of GCr15 Bearing Steel by Analyzing the Correlation of Carbide Dissolution Law and Pulsed Electric Current Parameters Through Machine Learning // *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2025. V. 38. P. 1207-1218.
46. Hu B., Wen Q., Guo Q., Wang Y., Sui H., Luo H. A novel electric pulse pathway to suppress plastic localization and enhance strain hardening of medium Mn steel // *Scripta Materialia*. 2022, V. 221. 114991.
47. Gu S., Liu C., Kimura Y., Yoon S., Cui Y., Yan X., Ju Y., Toku Y. Realizing strength–ductility synergy in a lean duplex stainless steel through enhanced TRIP effect via pulsed electric current treatment // *Materials Science and Engineering: A*. 2023. V. 883. 145534.
48. Li, J., Han, C., Wang, R., Zhao, G., Li, H. Achieving Synergistic Enhancement of Strength Ductility in 2205 Duplex Steel via Short-Time Pulse Current // *Metals and Materials International*. 2025.
49. Yi K., Xiang S., Zhou M., Zhang X., Du F. Altering the Residual Stress in High-Carbon Steel through Promoted Dislocation Movement and Accelerated Carbon Diffusion by Pulsed Electric Current // *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2023. V. 36, № 9. P. 1511 – 1522.
50. Yoon S., Gu S., Li S., Kimura Y., Toku Y., Ju Y. Efficiency improvement of fatigue crack healing by multiple high-density pulsed electric currents: Application to austenitic stainless steel // *Engineering Fracture Mechanics*. 2023. V. 284. 109235.
51. Kukudzhанov 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, № 5. P. 3223 – 3234.
52. Telpande S., Kumar C., Sharma D., Kumar P. Electric current-induced solid-state crack healing and life extension // *Acta Materialia*. 2025. V. 283. 120573.
53. Wang J., Zhang S., Liu Z., Chen H., Liu D. Simultaneously Reducing Porosity and Strengthening the Additively Manufactured 18Ni300 Steel Through Cyclic Electropulsing Treatment // *Metals and Materials International*. 2025. 113064.
54. Schipachev A., Aljadly M., Ganzulenko O., Chernikov D., Razzhivin V., Yusupov R. Evaluating the Effectiveness of Magnetic-Pulse Treatment for Healing Continuity Defects in the Metal of Oil and Gas Pipelines // *Metals*. 2023. V. 13, № 11. P. 1875.
55. Qian D., Wang R., Dong Z., Wang F. Microstructure evolution and wear resistance

improvement of ultrasonic peened M50 steel via electromagnetic shocking // *Steel Res. Int.* 2023. V. 94, № 10. 2300067.

56. 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, № 55. P. 1022-1029.

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

*I.S. Sugonyako - Postgraduate student, Engineer of the Reverse engineering center, Ufa State Petroleum Technological University.*

*A.Y. Morkina - Engineer of the Reverse engineering center of Ufa State Petroleum Technological University, Junior Research Associate of the Youth Laboratory "Metals and Alloys under Extreme Impacts" of the Ufa University of Science and Technology, postgraduate student of Institute for Metals Superplasticity Problems RAS,*

*D.V. Tarov - Research Engineer of the Fashion Laboratory "Metals and Alloys under Extreme Impacts" of the Ufa University of Science and Technology.*

*P.S. Tatarinov - Senior Lecturer of the Department «Electric Power Engineering and Automation of Industrial Production», Polytechnic Institute (branch) in Mirny, North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov.*

*Y.V. Bebikhov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Department «Electric power engineering and automation of industrial production», Polytechnic Institute (branch) in Mirny, North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov.*

*A.S. Semyonov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Polytechnic Institute (branch) in Mirny, North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov.*

*E.A. Korznikova - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Youth Laboratory "Metals and Alloys under Extreme Impacts", Ufa University of Science and Technology.*

*S.V. Dmitriev - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Ufa State Petroleum Technological University, Head of Lab. Institute of Molecule and Crystal Physics UFRC RAS, Chief Researcher IMSP RAS..*

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

Статья поступила в редакцию 08.08.2025; одобрена после рецензирования 25.08.2025; принята к публикации 01.09.2025.

The article was received by the editorial board on 08 Aug. 2025; approved after reviewing 25 Aug. 2025; accepted for publication 01 Sep. 2025.