

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 539.22

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.02.005

## ИНДУКТОРЫ ДЛЯ НАВЕДЕНИЯ ТОКОВ ФУКО В МЕТАЛЛАХ С ЦЕЛЬЮ МОДИФИКАЦИИ ИХ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ

Игорь Александрович Шепелев<sup>1</sup>, Адель Ильдарович Габдуллахатов<sup>2</sup>,  
Алина Юрьевна Моркина<sup>3</sup>, Илья Сергеевич Сугоняко<sup>4</sup>, Елена Александровна Корзникова<sup>5</sup>,  
Дмитрий Геннадьевич Черников<sup>6</sup>, Владимир Александрович Брызгалов<sup>7</sup>,  
Александр Сергеевич Семёнов<sup>8</sup>, Сергей Владимирович Дмитриев<sup>9</sup>

<sup>1,2,3,9</sup>Альметьевский государственный технологический университет, ул. Советская 216, 423450, Альметьевск, Россия

<sup>4,5</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет, ул. Космонавтов 1, 450064, Уфа, Россия

<sup>6</sup>Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Московское шоссе 34, 443086, Самара, Россия

<sup>7</sup>Уфимский университет науки и технологий, ул. Заки Валиди 32, 450076, Уфа, Россия

<sup>8</sup>Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН, просп. Октября 71, 450054, Уфа, Россия

<sup>1</sup>igor\_sar@li.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7240-9150>

<sup>2</sup>a.gabdullakhатов@yahoo.com, <https://orcid.org/0009-0004-0229-1080>

<sup>3</sup>alinamorkina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3989-0376>

<sup>4</sup>sgnilya@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-0129-7770>

<sup>5</sup>elena.a.korznikova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5975-4849>

<sup>6</sup>chernikov.dg@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2268-658X>

<sup>7</sup>bryzgalovv2000@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7435-0001>

<sup>8</sup>sash-alex@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9940-3915>

<sup>9</sup>dmitriev.sergey.v@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6744-4445>

**Аннотация.** В данной работе представлен обзор конструкций индукторов, используемых для наведения токов Фуко в металлах с целью модификации их структуры и свойств, а также обсуждаются основные принципы индукционного нагрева и особенности импульсного электромагнитного воздействия. Проанализированы преимущества обработки вихревыми токами по сравнению с классической электроимпульсной обработкой через электроды, включая бесконтактный характер воздействия, возможность работы с деталями сложной формы и отсутствие повреждения поверхности. Рассмотрены основные типы индукторов для переменного и импульсного тока: многовитковые цилиндрические спиральные катушки, плоские однослойные спирали для нагрева и формирования листовых заготовок, а также специализированные конструкции для заковки сферических деталей и импульсной штамповки тонколистовых материалов. Особое внимание уделено системам охлаждения индукторов, включающим замкнутые контуры водяного, воздушного и масляного охлаждения, а также комбинированные решения с оребрением и теплопроводящими материалами, обеспечивающие эффективный отвод тепла при высоких плотностях токов.

**Ключевые слова:** металлы и сплавы, структура и свойства, токи Фуко, индукторы, переменный ток, импульсный ток.

**Благодарности:** Для Ш.И.А., Г.А.И., М.А.Ю. и Д.С.В. (проведение экспериментальных исследований, написание статьи) работа выполнена за счет гранта (Фонд науки и технологий РТ, за 2025 год) на осуществление фундаментальных и поисковых исследований в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики РТ. Работа С.И.С. и К.Е.А. (изготовление индукторов) выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по программе ПРИОРИТЕТ 2030 УГНТУ.

**Для цитирования:** Шепелев И.А., Габдуллахатов А.И., Моркина А.Ю., Сугоняко И.С., Корзникова Е.А., Черников Д.Г., Брызгалов В.А., Семёнов А.С., Дмитриев С.В., Индукторы для наведения токов Фуко в металлах с целью модификации их структуры и свойств // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2026. Т. 23, № 2. С. 189-200. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.02.005.

Original article

**INDUCTORS FOR INDUCING FOUCAULT CURRENTS IN METALS TO MODIFY THEIR  
STRUCTURE AND PROPERTIES****Igor A. Shepelev<sup>1</sup>, Adel I. Gabdullakhatov<sup>2</sup>, Alina Yu. Morkina<sup>3</sup>, Илья С. Сугоняко<sup>4</sup>,  
Elena A. Korznikova<sup>5</sup>, Dmitry G. Chernikov<sup>6</sup>, Vladimir A. Bryzgalov<sup>7</sup>, Alexander S. Semenov<sup>8</sup>,  
Sergey V. Dmitriev<sup>9</sup>**<sup>1,2,3,9</sup>Almetyevsk State Technological University, Sovetskaya St., 216, 423450, Almetyevsk, Russia<sup>4,5</sup>Ufa State Petroleum Technological University, Kosmonavtov St., 1, 450064, Ufa, Russia<sup>6</sup>Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Moskovskoe Highway, 34, 443086, Samara, Russia<sup>7</sup>Ufa University of Science and Technology, Zaki Validi st. 32, 450076, Ufa, Russia<sup>8</sup>Institute of Molecule and Crystal Physics, UFRS RAS, Oktyabrya Ave. 71, 450054, Ufa, Russia<sup>1</sup>igor\_sar@li.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7240-9150><sup>2</sup>a.gabdullakhatov@yahoo.com, <https://orcid.org/0009-0004-0229-1080><sup>3</sup>alinamorkina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3989-0376><sup>4</sup>sgnilya@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-0129-7770><sup>5</sup>elena.a.korzniakova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5975-4849><sup>6</sup>chernikov.dg@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2268-658X><sup>7</sup>bryzgalovv2000@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7435-0001><sup>8</sup>sash-alex@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9940-3915><sup>9</sup>dmitriev.sergey.v@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6744-4445>

**Abstract.** This paper provides a review of inductor designs used to induce eddy (Foucault) currents in metals in order to modify their structure and properties, and discusses the fundamental principles of induction heating together with the specific features of pulsed electromagnetic treatment. The advantages of eddy-current processing over conventional electrode-based electropulsing are analyzed, including its contactless nature, suitability for components with complex geometries, and the absence of surface damage. The main inductor types for alternating and pulsed current are considered: multi-turn cylindrical spiral coils, flat single-layer spiral inductors for heating and forming sheet workpieces, and specialized designs for quenching spherical parts and impulse forming of thin sheets described in several patents. Special attention is paid to cooling systems for inductors, including closed-loop water, air, and oil circuits, as well as combined solutions using fins and thermally conductive materials that ensure efficient heat removal at high current densities.

**Keywords:** metals and alloys, structure and properties, eddy currents, inductors, alternating current, pulsed current.

**Acknowledgements:** For Sh.I.A., G.A.I., M.A.Yu., and D.S.V. (conducting experimental studies, writing the article), the work was supported by a grant awarded in 2025 by the Science and Technology Foundation of the Republic of Tatarstan for the implementation of fundamental and exploratory research in scientific and educational organizations, enterprises, and organizations of the real sector of the economy of the Republic of Tatarstan. The work of S.I.S. and K.E.A. (manufacturing of inductors) was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the PRIORITY 2030 program of Ufa State Petroleum Technological University.

**For citation:** Shepelev I.A., Gabdullakhatov A.I., Morkina A.Yu., Sugonyako I.S., Korznikova E.A., Chernikov D.G., Bryzgalov V.A., Semenov A.S., Dmitriev S.V. (2026). Inductors for inducing foucault currents in metals to modify their structure and properties. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 23(2), 189-200. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.02.005.

**Введение**

Инженеры и материаловеды постоянно ищут пути повышения эксплуатационных свойств и долговечности деталей и конструкций, изготовленных из металлов и сплавов. Данные свойства снижаются в результате износа, коррозии, накопления усталостных повре-

ждений и прочих воздействий [1–4]. Для повышения эксплуатационных свойств и продления ресурса металлических изделий применяют классические методы, такие как термообработка, нанесение покрытий и другие. В последнее время растет интерес к использованию токов Фуко (вихревых токов) для решения подобных задач [5, 6].

Мощные электромагнитные токи вызывают так называемый электропластический эффект, который позволяет точно разогреть места с наиболее искаженной кристаллической решеткой [7–9], не нагревая металл в среднем до высокой температуры, что, в свою очередь, позволяет использовать его как более безопасную и энергоэффективную альтернативу стандартной термообработке.

Обработка вихревыми токами имеет определенные преимущества над стандартной электроимпульсной обработкой (при помощи электродов) [10]: отсутствие прямого контакта, что в свою очередь исключает образование искр и позволяет использовать детали со сложной геометрией. Также стоит отметить, что применение вихревых токов не приводит к повреждению поверхности, а также способствует более равномерной обработке [11].

Обработка вихревыми токами является одним из потенциальных способов для заживления дефектов в нефтяных и газовых трубах, так как электродная обработка плохо справляется с деталями сложной формы [12], а стандартная обработка дефектов заключается в дорогостоящей замене секции, или термообработке [13, 14]. Также мощные электромагнитные токи позволяют адекватно заживать усталостные дефекты в магниевых [5], стальных [15] и медных сплавах [6].

Ключевым элементом технологии обработки вихревыми токами выступает индуктор, являющийся специализированным нагревательным элементом, формирующий высокочастотное переменное магнитное поле (частотой от единиц кГц до МГц) [16–20], которое эффективно индуцирует плотные замкнутые токи в проводящем материале по закону электромагнитной индукции Фарадея. Разнообразие конструкций индукторов: от цилиндрических (для труб и стержней) и щелевых (для плоских поверхностей) до секционированных и зигзагообразных, – обеспечивает адаптацию к сложным геометриям объектов, недоступным для электродных систем, и точный контроль глубины проникновения поля за счет скин-эффекта.

В данной работе мы провели собственный эксперимент с самодельными индукторами, а также представили литературный обзор работ по изучению вихревого тока, в частности по индукторам, основными принципами их работы, в подробностях описали их основные типы и методы охлаждения.

## Основные принципы индукционного нагрева металлов

Индукционный нагрев в рамках электроимпульсной обработки представляет собой бесконтактный электромагнитный способ модификации свойств материалов. Рабочая катушка создает изменяющееся магнитное поле, которое в свою очередь индуцирует электродвижущую силу в проводящем изделии (Рисунок 1). Медная катушка, которая запитывается импульсным переменным током высокого напряжения (5-15 кВ от конденсаторных батарей), пропускает ток с частотами 10 кГц – несколько МГц и длительностью импульсов от 50-500 мкс. Данные параметры формируют колеблющееся магнитное поле.

Проводники (заготовки), помещенные в электромагнитное поле, начинают нагреваться по вышеописанным законам электромагнитной индукции. Интенсивный нагрев получается в полях с высокой напряженностью и высокими частотами, которые создаются индукторами, которые служат в виде первичной обмотки воздушного трансформатора, вторичной обмоткой которого служит нагреваемая заготовка.

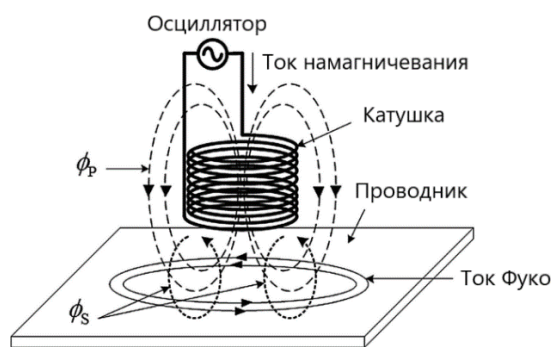
Величина вихревого тока пропорциональна: величине магнитного поля, площади петли, скорости изменения магнитного потока, проводимости проводника.

Вихревые токи противодействуют изменению магнитного поля, которое их создает, что приводит к потере энергии в проводнике, т.е. нагреванию проводника и замедлению его движения.

Установки индукционного нагрева классифицируются по диапазонам рабочих частот следующим образом:

- а) низкочастотные (промышленной частоты, 50 Гц);
- б) среднечастотные (повышенной частоты, до 10 кГц);
- в) высокочастотные (свыше 10 кГц).

Такое разделение обусловлено техническими и технологическими требованиями. Физические принципы и основные количественные закономерности поглощения энергии электромагнитного поля проводящей средой едины для всех частотных диапазонов.



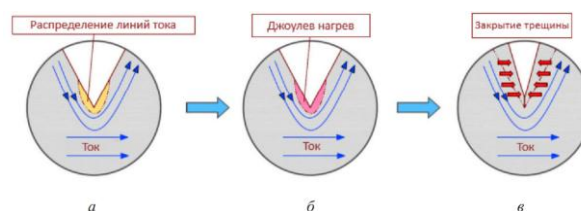
**Рис. 1.** Схема работы индуктора и наведения токов на поверхность материала (взято из [21])

**Fig. 1.** Schematic diagram of the inductor operation and the induction of currents on the surface of the material (taken from [21])

Частота существенно влияет на интенсивность и специфику нагревательного процесса. При частоте 50 Гц и напряженности магнитного поля 3000÷5000 А/м удельная мощность нагрева составляет не более 10 Вт/см<sup>2</sup>, тогда как при высокочастотном нагреве она достигает 100÷1000 Вт/см<sup>2</sup>, обеспечивая температуры, достаточные для плавления тугоплавких металлов.

При этом с ростом частоты уменьшается глубина проникновения вихревых токов в металл, что приводит к нагреву более тонкого поверхностного слоя, и наоборот. На высоких частотах реализуется преимущественно поверхностный нагрев, тогда как снижение частоты увеличивает глубину пропускания токов, позволяя проводить глубинный или сквозной нагрев с равномерным распределением температуры по всему сечению изделия. Выбор частоты таким образом определяет требуемый характер нагрева и его интенсивность в соответствии с технологическими задачами. Возможность регулировки толщины нагреваемого слоя практически произвольно является ключевым преимуществом индукционного нагрева, широко применяемого для поверхностной закалки деталей и инструмента.

Полученный разогрев заготовки приводит к локализации джоулева тепла на дефектах и несовершенствах решетки, вместе с этим общий разогрев заготовки сильно ниже по сравнению со стандартной термообработкой. Схема воздействия импульсов тока на трещину представлена на рисунке 2 [22].



**Рис. 2.** Схематическое изображение действия импульсного тока на образец с трещиной: (а) концентрация электрического тока вблизи вершины трещины; (б) локальный нагрев, обусловленный токами, фокусирующимися у вершины трещины; (в) смыкание трещины за счёт теплового расширения и последующего термического сжатия. (Взято из [22])

**Fig. 2.** Schematic representation of the effect of pulsed current on a specimen with a crack: (a) concentration of electric current near the crack tip; (b) local heating caused by currents localized at the crack tip; (c) crack closure resulting from thermal expansion and subsequent thermal contraction. (Taken from [22])

При прохождении электрического тока через образец, в вершине трещины образуется поле высокоплотного электрического тока, который впоследствии расплавляет часть вершины и начинает закрывать трещину.

## Основные типы индукторов для импульсного воздействия на металлы

### Многовитковые спиральные индукторы

Многовитковые спиральные индукторы применяются для получения импульсов с длительностью полупериода около 100 мкс, и часто используются в процессах прессования.

Индуктор выполняют в виде цилиндрической катушки из медной трубки, навитой винтообразно с постоянным шагом, либо в виде ряда почти плоских витков, которые соединяются наклонными участками.

В статье [12] многовитковый индуктор с медной катушкой использовался для заживления трещин в стальных трубах (Рисунок 3). Объектом исследования являлась дефектная секция газовой трубы из 17G1S низколегированной стали (Рисунок 4).

В ходе исследования авторами наблюдался вышеописанный концентрированный джоулев нагрев на вершинах трещины, который в свою очередь привел к сплавлению и постепенному “залечиванию” усталостной трещины. Но, сто-

ит отметить что несмотря на успешное залечивание трещины, при достаточно больших расстояниях между вершинами трещины, залечивание становится менее эффективным.



Рис. 3. Индуктор для магнитоимпульсной обработки (взято из [12]).

Fig. 3. Inductor for magnetic-pulse processing (taken from [12])



Рис. 4. Фрагмент дефектной газовой трубы из стали 17G1S (взято из [12]).

Fig. 4. A fragment of a defective gas pipeline made of 17G1S steel (taken from [12]).

Также нами было проведено небольшое исследование по магнитоимпульсному обжатию цилиндрических образцов с помощью многовиткового индуктора (с 2, 3 и 4 витками, Рисунок 5).



Рис. 5. Индукторы с различным числом витков.

Fig. 5. Inductors with a different number of coils

Из медной проволоки диаметром 4 мм были изготовлены индукторы с различным числом витков. Внутренний диаметр индукторов был на 3 мм больше наружного диаметра деформируемого цилиндра, то есть зазор между витками индуктора и поверхностью цилиндра составлял 1,5 мм.

Через индуктор, расположенный посередине цилиндрического образца, пропускался импульс тока от конденсатора емкостью  $C=25$  мФ, заряженного до напряжения  $U=450$  В. Энергия, запасенная конденсатором, равнялась  $E = CU^2/2 = 2,5$  кДж. Продолжительность импульса составляет порядка  $10^{-4}$  с. В качестве цилиндрического образца использовались алюминиевые банки с толщиной стенки 0,1 мм диаметром  $D=66$  мм и длиной  $L=160$  мм, а также цилиндры, намотанные из пяти слоев алюминиевой фольги толщиной 0,11 мм.

На рисунке 6 показан цилиндр из пяти слоев алюминиевой фольги, продеформированный импульсом тока в индукторе с тремя витками. На алюминиевых банках импульс тока в индукторе тоже вызывал локализованную остаточную деформацию в зоне воздействия электромагнитной волны, в виде коробления с амплитудой примерно 0,5 мм. Для получения более значительной деформации необходимо повышать энергию разряда, но используемая батарея конденсаторов не позволяла этого сделать. Сравнение разных индукторов показало, что глубина обжатия цилиндров практически не зависела от числа витков, а ширина обжатия, ожидаемо, несколько возрастала с увеличением числа витков.



Рис. 6. Локализованная деформация цилиндра из пяти слоев алюминиевой фольги, инициированная импульсом тока в индукторе.

Fig. 6. Localized deformation of a cylinder made of five layers of aluminum foil, initiated by a current pulse in the inductor.

Для анализа формы потери устойчивости цилиндрических образцов под действием

внешнего давления полезно оценить частоты собственных изгибных колебаний, которые могут быть рассчитаны по формуле:

$$n_m = \frac{m(m^2 - 1)}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{m^2 + 1}} \cdot \frac{x}{R^2}, \quad x = h \cdot \left( \frac{E}{12 \cdot (1 - n^2) \cdot r} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $m = 2, 3, \dots$  – номер гармоники,  $R$  и  $h$  – радиус и толщина цилиндрической оболочки,  $E$ ,  $n$  и  $r$  – модуль Юнга, коэффициент Пуассона и плотность материала оболочки. Подставляя численные значения для алюминиевой оболочки,  $R = 0,033$  м,  $h = 10^{-4}$  м,  $E = 7 \times 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>,  $n = 0,33$ ,  $r = 2700$  кг/м<sup>3</sup>, преобразуем выражение (1) к виду:

$$n_m = 22,8 \cdot \frac{m(m^2 - 1)}{\sqrt{m^2 + 1}}. \quad (2)$$

Для  $m \gg 1$  последнее выражение упрощается до:

$$n_m = 22,8 \cdot m^2. \quad (3)$$

Как отмечалось выше, длительность импульса тока при разряде конденсатора составляет около  $10^{-4}$  с, что соответствует частоте порядка 10 кГц. Подставляя эту частоту в выражение (3) находим номер гармоники  $m = 21$ . Таким образом, потеря устойчивости алюминиевой банки под действием импульса тока должен происходить с образованием двух десятков волн по окружности, что и наблюдалось в эксперименте.

Также стоит отметить работу [5], где авторы использовали многovitковый индуктор для залечивания усталостных трещин в трубе из магниевых сплава (Mg-RE, где RE – редкоземельный элемент). Трубочатые образцы фиксировались на валу из нержавеющей стали, размещённом внутри медной катушки. Катушка подключалась к высоковольтному импульсному источнику питания с конденсаторной батареей, обеспечивающей максимальное напряжение разряда до 15 кВ и энергию до 50 кДж.

При разряде конденсатора в катушке формировалась затухающая электромагнитная волна. Для предотвращения радиального сжатия трубчатого образца он располагался снаружи относительно вала из нержавеющей стали, как показано на рисунке 7. В процессе обработки вихревыми токами наблюдалось практически полное залечивание микротрещин в образцах. Сокращение интервала охлаждения способствовало более быстрому и более протяжённому закрытию трещин. Одновременно фикси-

ровалось повышение механических характеристик, включая прочность и относительное удлинение, что указывает на положительное влияние температурного фактора на эффективность залечивания дефектов.

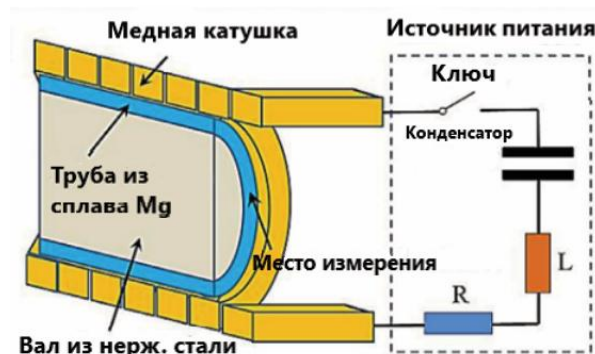


Рис. 7. Многовитковый индуктор для обработки вихревым током. По результатам работы [5].

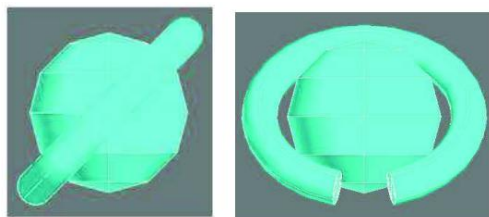
Fig. 7. Multi-turn inductor for eddy-current treatment. Based on the results of [5].

### Одновитковые индукторы

Одновитковый индуктор представляет собой по сути один виток шины/трубы сложной или простой формы, по которому протекает ток высокой частоты или импульсный ток большой амплитуды. Такая геометрия даёт малую индуктивность контура и позволяет получать очень большие токи и высокую плотность магнитного потока в зоне обработки. Данные индукторы эффективны для генерации коротких импульсов ( $5 \div 20$  мкс) с высокой амплитудой индукции ( $40 \div 60$  Тл).

Работ по одновитковым индукторам достаточно мало из-за особенностей их использования. Они дают ток очень высокой частоты, но вместе с этим они недолговечны и могут ощутимо разрушить материал.

Стоит выделить работу [23], где авторы проектировали одновитковый индуктор для закалки сферических деталей. Авторами получена модель одновиткового индуктора и сфероида в программе FLUX, при помощи метода конечных элементов (Рисунок 8). В результате моделирования авторами была получена модель индукционной установки для нагрева сферических деталей под закалку. Также они выделили основные параметры режима нагрева, которые должны обеспечивать достижение определенных кондиций для его эффективного использования.



**Рис. 8.** Геометрическая модель индуктора и сферы, заключенной в сфероид (Взято из [23])

**Fig. 8.** Geometric model of the inductor and of the sphere enclosed in a spheroid.

### Плоские индукторы

Для обработки листовых деталей часто используют плоские индукторы со спиральной или произвольной укладкой витков (Рисунок 9).



**Рис. 9.** Внешний вид конструкции плоского индуктора (взято из [24])

**Fig. 9.** External view of the flat inductor design (taken from [24])

Плоские индукторы для нагрева чаще всего выполняют в виде однослойной плоской спирали (архимедовой) из медной трубки или шины, уложенной на электро- и теплоизоляционном основании. При протекании переменного тока высокой частоты в такой спирали над её плоскостью формируется переменное магнитное поле, индуцирующее вихревые токи в прилегающей плоской детали (лист, диск, торец вала и др.). За счёт скин-эффекта тепло выделяется в поверхностном слое детали, обеспечивая быстрый локальный нагрев без контакта.

Стоит выделить патент [25], в котором описан плоский индуктор в виде однослойной архимедовой спирали, расположенной на изоляционном основании и подключённой к источнику ВЧ тока; между витками основной спирали размещена промежуточная ферромагнитная спираль-концентратор. Такое решение уменьшает рассеянное поле, снижает перегрев центральных витков и делает распределение температуры на плоской детали более равномерным.

Также стоит выделить патент [26], где авторы спроектировали плоский индуктор, позволяющий проводить импульсную штамповку тонколистных материалов.

### Способы охлаждения индукторов

В обработке металлов вихревым током системы охлаждения индукторов и катушек, как правило, основаны на замкнутых контурах циркуляции жидкости или газа, интегрированных непосредственно в проводник импульсного тока для отвода интенсивного джоулева и вихревого нагрева, возникающего при очень коротких импульсах большой амплитуды [27].

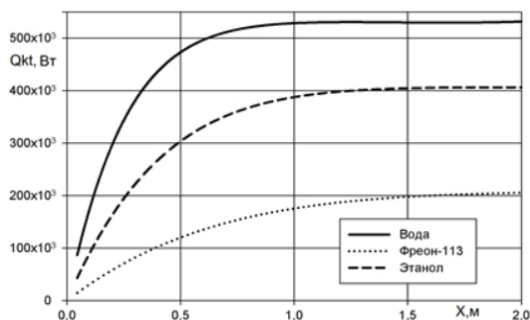
Катушки в индукторах обычно изготавливают из полых медных проводников с внутренними водяными каналами, так что охлаждающая жидкость проходит через витки индуктора, ограничивая рост температуры и позволяя повышать частоту повторения импульсов без размягчения меди и повреждения изоляции. Аналитические и экспериментальные исследования магнитно-импульсной обработки показывают, что сильный джоулев нагрев влияет не только на заготовку, но и существенно нагревает токопроводящие элементы системы формирования поля, поэтому эффективное охлаждение катушки является ключевым ограничением при проектировании надежного оборудования [28].

Воздушное охлаждение реализуется принудительным потоком воздуха (вентиляторы) и часто используется в электромагнитных мельницах, где поток воздуха отводит тепло от обмотки и сердечника индуктора [19]. Масляное охлаждение применяет трансформаторное масло, циркулирующее по каналам индуктора; оно является наиболее распространенным в промышленных электромагнитных мельницах благодаря хорошей теплоемкости и диэлектрическим свойствам масла [29].

Водяное охлаждение включает подачу воды через внутренние каналы или рубашку вокруг катушки; вода эффективно отводит тепло за счет высокой теплоемкости и турбулентного потока, что снижает температуру обмотки и магнитного концентратора [30].

Охлаждение радиаторами и теплопроводящими материалами использует внешние ребра на токопроводе и теплопроводящие вставки, чтобы увеличить поверхность теплообмена и обеспечить двухстороннее отведение тепла между импульсами. Стоит выделить статью [31], где авторы рассматривают расчетную модель системы охлаждения индукционного устройства с различными силовыми обмотками с различными типами охлаждающих жидкостей (вода, этанол и фреон-113), и помимо них, в системе использовались пучки плоских оребрен-

ных труб со сплошными гофрированными ребрами в качестве поверхности теплообмена в конденсаторе. Авторы, исходя из своего комбинированного подхода, смогли определить, что наиболее эффективной жидкостью для отвода тепла во внешнюю среду является фреон-113 (Рисунок 10).



**Рис. 10.** График зависимости отводимой тепловой мощности от глубины бокса конденсатора (взято из [31])

**Fig. 10.** Graph showing the relationship between the heat dissipation capacity and the depth of the condenser box (taken from [31])

Исходя из вышеописанных статей и патентов, можно сделать вывод, что комбинированный подход является наиболее оптимальным для использования в магнитоимпульсной обработке, так как он обеспечивает достаточно эффективный отвод тепла и высокую технологичность

### Выводы

В проведённой работе рассмотрены конструкции индукторов для наведения вихревых токов в металлах и показано, что выбор геометрии, материалов и системы охлаждения существенно влияет как на распределение электромагнитного поля, так и на термомеханический режим обработки. Анализ литературных данных и патентных решений позволяет заключить, что для импульсных и переменных токов оптимальными являются конструкции из полых медных проводников с системой водяного, воздушного, масляного и комбинированного охлаждения, а также использование оребрения и теплопроводящих вставок, обеспечивающих эффективный отвод тепла между импульсами и высокую технологичность конструкции. Отдельно показано, что комбинация нескольких способов охлаждения (внутренние каналы + оребрение + теплопроводящие материалы) является наиболее рациональной для магнитоим-

пульсной обработки, поскольку она позволяет поддерживать работоспособность индукторов при высоких плотностях тока и повторяемости импульсов.

Также нами были проведены эксперименты по магнито-импульсному обжатию цилиндрических образцов (алюминиевые банки и многослойные цилиндры из фольги) с помощью внешнего индуктора из медной проволоки. При разряде конденсатора ёмкостью 25 мФ от напряжения 450 В (запасённая энергия 2,5 кДж) в зоне воздействия индуктора фиксировалась локализованная остаточная деформация в форме обжатия и коробления. Установлено, что глубина обжатия практически не зависит от числа витков индуктора, тогда как ширина зоны деформации закономерно возрастает с их числом. Аналитическая оценка собственных частот изгибных колебаний цилиндрической оболочки показала, что при частоте импульса ~10 кГц потеря устойчивости должна происходить с образованием около 20 волн по окружности, что хорошо согласуется с экспериментально наблюдаемой картиной деформации. Для достижения более значительных степеней деформации необходимо увеличение энергии разряда сверх возможностей применявшейся батареи конденсаторов.

Отметим недавние работы по успешному залечиванию трещин импульсным током [32, 33] снижению пружинения титанового сплава за счет пропуска импульсов тока через образец в деформированном состоянии [34]. Импульсный ток повышает пластичность металлов и сплавов [35-38]. Показано, что при анализе электропластического эффекта важно учитывать аномальную теплопроводность металлов на нано- и микро-масштабах [39, 40].

В совокупности результаты обзора и экспериментов подтверждают, что корректно спроектированные индукторы с комбинированным охлаждением обеспечивают требуемые уровни электромагнитного воздействия и стабильность температурного режима, а параметры импульса и геометрия индукторов определяют характер и локализацию пластической деформации при магнито-импульсной обработке.

### Список литературы

1. 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 // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Vol. 764. – P. 73-79.
2. Elangeswaran C., Cutolo A., Muralidharan G.K., Formanoir C. de, Berto F., Vanmeensel K., Hooreweder B.V. Effect of post-treatments on the fatigue behaviour of 316L stainless steel manufactured

- by laser powder bed fusion // *International Journal of Fatigue*. – 2019. – Vol. 123. – P. 31-39.
3. Boyce B.L., Michael J.R., Kotula P.G. Fatigue of metallic microdevices and the role of fatigue-induced surface oxides // *Acta Materialia*. – 2004. – Vol. 52. – No. 6. – P. 1609-1619.
4. Bryzgalov V.A et al. High-density pulsed current: a review of its role in healing macrocracks in metals // *Materials. Technologies. Design*. – 2024. – Vol. 6. – No. 2(17). – P. 38-58.
5. Xu W., Yang C., Yu H., Jin X., Yang G., Shan D., Guo B. Combination of eddy current and heat treatment for crack healing and mechanical-property improvement in magnesium alloy tube // *Journal of Magnesium and Alloys*. – 2021. – Vol. 9. – No. 5. – P. 1768-1781.
6. Santa S., Sulaiman F., Eldy E.F. Eddy Current Testing technique to detect imperfection surface for different lift-off value on copper metal // *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. – 2020. – Vol. 9. – No. 3. – P. 1879-1884.
7. Bryzgalov V.A., Dmitriev S.V., Korznikova E.A., Bebikhov Yu.V. Modeling of the dislocation electroplastic effect in a single crystal using the molecular dynamics method // *Frontier materials & technologies*. – 2022. – No. 3. – P. 61-68.
8. Conrad H. Electroplasticity in metals and ceramics // *Materials Science and Engineering: A*. – 2000. – Vol. 287. – No. 2. – P. 276-287.
9. Ghiotti A., Bruschi S., Simonetto E., Gennari C., Calliari I., Bariani P. Electroplastic effect on AA1050 aluminium alloy formability // *CIRP Annals*. – 2018. – Vol. 67. – No. 1. – P. 289-292.
10. Xu W., Yang C., Yu H., Jin X., Guo B., Shan D. Microcrack healing in non-ferrous metal tubes through eddy current pulse treatment // *Scientific Reports*. – 2018. – Vol. 8. – No. 1. – P. 6016.
11. Qin R., Bhagurkar A. Effect of pulsating solidification on the surface properties of conductive materials // *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 2022. – Vol. 478. – No. 2261. – P. 20210726.
12. 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. – Vol. 13. – No. 11. – P. 1875.
13. Adeleke A.A., Ikubanni P.P., Orhadahwe T.A., Aweda J.O., Odusote J.K., Agboola O.O. Microstructural assessment of AISI 1021 steel under rapid cyclic heat treatment process // *Results in Engineering*. – 2019. – Vol. 4. – P. 100044.
14. Murray J.W., Clare A.T. Repair of EDM induced surface cracks by pulsed electron beam irradiation // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2012. – Vol. 212. – No. 12. – P. 2642-2651.
15. Yang C., Xu W., Guo B., Shan D., Zhang J. Healing of fatigue crack in 1045 steel by using eddy current treatment // *Materials*. – 2016. – Vol. 9. – No. 8. – P. 641.
16. Magnetic effects of current, inductance, and eddy currents // *Science and technology of liquid metal coolants in nuclear engineering*. – Elsevier, 2022. – P. 481-490.
17. Патент № RU 2853171 С1. Способ магнитно-импульсной сварки труб и биметаллических переходников и устройство для его осуществления. № 2025100566, опубл. 10.01.2025 / Д.Г. Черников, В.Н. Самохвалов, Н.В. Самохвалов, Д.А. Жданов, Р.Ю. Юсупов.
18. Патент № RU 235516 U1. Индуктор для магнитно-импульсной обработки при объёмной электродуговой наплавке. № 2024133769, опубл. 04.07.2025 / К.В. Никитин, С.С. Жаткин, Д.Г. Черников, Д.А. Дунаев, А.К. Скороумов.
19. Патент № RU 2830518 С1. Способ и устройство воздушного канального охлаждения индукторных систем для магнитно-импульсной обработки материалов. № 2023123028, опубл. 21.11.2024 / Д.Г. Черников, В.Н. Самохвалов, Р.Ю. Юсупов, О.И. Кибисов.
20. Патент № RU 221911 U1. Индуктор для магнитно-импульсного обжима трубчатых деталей. № 2022129000, опубл. 29.11.2023 / Р.Ю. Юсупов, Д.Г. Черников, И.А. Пфетцер.
21. Chen Z., Jomdecha C., Xie S. Eddy current testing // *Handbook of Advanced Non-Destructive Evaluation/ eds. N. Ida, N. Meyendorf*. – Cham: Springer International Publishing, 2019. – P. 1-84.
22. Yin Y., Chen H., Morita Y., Toku Y., Ju Y. Effect of electropulsing treatment on the fatigue crack growth behavior of copper // *Materials*. – 2018. – Vol. 11. – No. 11. – P. 2168.
23. Клочкова Н.Н., Обухова О.В., Проценко А.Н. Проектирование одновиткового индуктора для закалки сферических деталей средствами программного пакета Flux // *Вестник Самарского Государственного Технического Университета. Серия Технические науки*. – 2016. – Vol. 2. – No. 50.
24. Долгих И.Ю., Корюкин Л.Б. Разработка модели для оптимизации параметров индукционно-стыковой сварки стальных изделий плоским индуктором // *Вестник ИГЭУ*. – 2018. – No. 4.
25. Патент № RU2193293С2. Индукционный нагреватель для плоских вытянутых поверхностей: заявл. 2000 / С.К. Земан, П.Г. Бабенко.
26. Патент № RU 2833305 С1. Устройство для импульсной штамповки особо тонколистовых материалов. № 2023125187, опубл. 16.01.2025 / Д.Г. Черников, Р.Ю. Юсупов, А.В. Казаков.
27. Samokhvalov V.N., Chernikov D.G., Yusupov R.Yu. Efficiency assessment of air channel cooling of a multi-turn coil for magnetic pulse processing of metals // *Russian Engineering Research*. – 2024. – Vol. 44. – No. 1. – P. 54-60.
28. Rosenbluth M.N., Furth H.P., Case K.M. Minimization of conductor surface heating by a pulsed magnetic field // *Journal of Applied Physics*. – 1974. – Vol. 45. – No. 3. – P. 1097-1099.

29. Патент № KR20150020753A. Cooling and oil churning rotor structure for induction motor, опубл. 2015 / K. Sangjin – 7 с.

30. Specht F.R. Water cooling for induction systems // Induction Heating and Heat Treatment / eds. V. Rudnev, G.E. Totten. – ASM International, 2014. – P. 714-720.

31. Кинев Е.С., Тяпин А.А., Гришко Г.С. Модель системы охлаждения индукционного устройства // Международный научно-исследовательский журнал. – 2019. – №11 (89).

32. Kukudzhanov K.V., Korznikova E.A., Chentsov A.V., Dmitriev S.V. A novel approach to determining the parameters of electric pulse healing of fatigue cracks // Materials Letters. – 2026. – Vol. 404. – P. 139565.

33. 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. – Vol. 59. – No. 5. – P. 3223-3234.

34. Morkina A.Y., Tarov D.V., Tatarinov P.S., Bebikhov Y.V., Korznikova E.A., Dmitriev S.V. Electric pulse treatment of grade 5 titanium alloy plates after bending to reduce springback effect // Mechanics of Solids. – 2025. – Vol. 60. – No. 3. – P. 2344-2352.

35. Tatarinov V.P., Tatarinov P.S., Semenov A.S., Bebikhov Y.V., Yakushev I.A., Dmitriev S.V. Development of the method for measuring large magnitude pulse currents for studying the electroplastic effect and its modeling // Proceedings - 2025 7th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2025. – 2025. – P. 967-971.

36. 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. – 2025. – Vol. 22. – No. 4. – P. 615-632

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

38. Khalikova G.R., Korolkov O.E., Stolyarov V.V., Korznikova E.A., Dmitriev S.V. Competing deformation mechanisms of Grade 2 titanium under electrically assisted tension // Journal of Materials Research. – 2026. – Vol. 41. – No. 3. – P. 494-507.

39. Abdullina D.U., Kuzkin V.A., Krivtsov A.M., Kudreyko A.A., Dmitriev S.V. Heat transfer regimes and the electroplasticity effect: A molecular dynamics study // Physical Review B. – 2025. – Vol. 112. – No.14. – P. 1443101 – 14431012.

40. Семёнова М.Н., Бебихов Ю.В., Татаринцов В.П., Татаринцов П.С., Якушев И.А., Абдуллина Д.У., Семёнов А.С., Дмитриев С.В. Обзор технологий и первых результатов в области электроим-

пульсной обработки металлов и сплавов на основе эффекта электропластичности // Фундаментальные проблемы современно-го материаловедения. – 2026. – Т. 23. – № 1. – С. 106-123.

### Информация об авторах

*И.А. Шепелев – старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела Альметьевского государственного технологического университета «Высшая школа нефти».*

*А.И. Габдуллахатов – Инженер-программист, Центр компетенций по исследованию осложнений и взаимовлияния технологий в процессах нефтедобычи Альметьевского государственного технологического университета «Высшая школа нефти».*

*А.Ю. Моркина – аспирант Уфимского государственного нефтяного технического университета, научный сотрудник Альметьевского государственного технологического университета «Высшая школа нефти».*

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

*Е.А. Корзникова – доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование» Уфимского государственного нефтяного технического университета.*

*Д.Г. Черников – доцент кафедры Обработки металлов давлением Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева.*

*В.А. Брызгалов – аспирант Уфимского университета науки и технологий, младший научный сотрудник лаборатории «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях».*

*А.С. Семёнов – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Физика конденсированного состояния» института Физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН.*

*С.В. Дмитриев – доктор физико-математических наук, профессор, научный сотрудник Альметьевского государственного технологического университета «Высшая школа нефти».*

### References

1. 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 // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Vol. 764. – P. 73-79.

2. Elangeswaran C., Cutolo A., Muralidharan G.K., Formanoir C. de, Berto F., Vanmeensel K., Hooreweder B.V. Effect of post-treatments on the fatigue behaviour of 316L stainless steel manufactured by laser powder bed fusion // International Journal of Fatigue. – 2019. – Vol. 123. – P. 31-39.

3. Boyce B.L., Michael J.R., Kotula P.G. Fatigue of metallic microdevices and the role of fatigue-induced surface oxides // *Acta Materialia*. – 2004. – Vol. 52. – No. 6. – P. 1609-1619.
4. Bryzgalov V.A. et al. High-density pulsed current: a review of its role in healing macrocracks in metals // *Materials. Technologies. Design*. – 2024. – Vol. 6. – No. 2(17). – P. 38-58.
5. Xu W., Yang C., Yu H., Jin X., Yang G., Shan D., Guo B. Combination of eddy current and heat treatment for crack healing and mechanical-property improvement in magnesium alloy tube // *Journal of Magnesium and Alloys*. – 2021. – Vol. 9. – No. 5. – P. 1768-1781.
6. Santa S., Sulaiman F., Eldy E.F. Eddy current testing technique to detect imperfection surface for different lift-off value on copper metal // *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. – 2020. – Vol. 9. – No. 3. – P. 1879-1884.
7. Bryzgalov V.A., Dmitriev S.V., Korznikova E.A., Bebikhov Yu.V. Modeling of the dislocation electroplastic effect in a single crystal using the molecular dynamics method // *Frontier Materials & Technologies*. – 2022. – No. 3. – P. 61-68.
8. Conrad H. Electroplasticity in metals and ceramics // *Materials Science and Engineering: A*. – 2000. – Vol. 287. – No. 2. – P. 276-287.
9. Ghiotti A., Bruschi S., Simonetto E., Gennari C., Calliari I., Bariani P. Electroplastic effect on AA1050 aluminium alloy formability // *CIRP Annals*. – 2018. – Vol. 67. – No. 1. – P. 289-292.
10. Xu W., Yang C., Yu H., Jin X., Guo B., Shan D. Microcrack healing in non-ferrous metal tubes through eddy current pulse treatment // *Scientific Reports*. – 2018. – Vol. 8. – No. 1. – P. 6016.
11. Qin R., Bhagurkar A. Effect of pulsating solidification on the surface properties of conductive materials // *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 2022. – Vol. 478. – No. 2261. – P. 20210726.
12. 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. – Vol. 13. – No. 11. – P. 1875.
13. Adeleke A.A., Ikubanni P.P., Orhadahwe T.A., Aweda J.O., Odusote J.K., Agboola O.O. Microstructural assessment of AISI 1021 steel under rapid cyclic heat treatment process // *Results in Engineering*. – 2019. – Vol. 4. – P. 100044.
14. Murray J.W., Clare A.T. Repair of EDM induced surface cracks by pulsed electron beam irradiation // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2012. – Vol. 212. – No. 12. – P. 2642-2651.
15. Yang C., Xu W., Guo B., Shan D., Zhang J. Healing of Fatigue Crack in 1045 Steel by Using Eddy Current Treatment // *Materials*. – 2016. – Vol. 9. – No. 8. – P. 641.
16. Magnetic effects of current, inductance, and eddy currents // *Science and Technology of Liquid Metal Coolants in Nuclear Engineering*. – Elsevier, 2022. – P. 481-490.
17. Patent No. RU 2853171 C1. Method of magnetic-pulse welding of pipes and bimetallic adapters and device for its implementation: No. 2025100566; published 10.01.2025 / D.G. Chernikov, V.N. Samokhvalov, N.V. Samokhvalov, D.A. Zhdanov, R.Yu. Yusupov.
18. Patent No. RU 235516 U1. Inductor for magnetic-pulse processing during volumetric arc surfacing: No. 2024133769; published 04.07.2025 / K.V. Nikitin, S.S. Zhatkin, D.G. Chernikov, D.A. Dunaev, A.K. Skoroumov.
19. Patent No. RU 2830518 C1. Method and device for air channel cooling of inductor systems for magnetic-pulse processing of materials: No. 2023123028; published 21.11.2024 / D.G. Chernikov, V.N. Samokhvalov, R.Yu. Yusupov, O.I. Kibisov.
20. Patent No. RU 221911 U1. Inductor for magnetic-pulse crimping of tubular parts: No. 2022129000; published 29.11.2023 / R.Yu. Yusupov, D.G. Chernikov, I.A. Pfetzer.
21. Chen Z., Jomdecha C., Xie S. Eddy Current Testing // *Handbook of Advanced Non-Destructive Evaluation/ eds. N. Ida, N. Meyendorf*. – Cham: Springer International Publishing, 2019. – P. 1-84.
22. Yin Y., Chen H., Morita Y., Toku Y., Ju Y. Effect of Electropulsing Treatment on the Fatigue Crack Growth Behavior of Copper // *Materials*. – 2018. – Vol. 11. – No. 11. – P. 2168.
23. Klochkova N.N., Obukhoba O.B., Protsenko A.N. Design of a single-turn inductor for quenching spherical parts using the FLUX software package // *Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Technicheskogo Universiteta. Technical Sciences Series*. – 2016. – Vol. 2. – No. 50.
24. Dolgikh I.Yu., Koryukin L.B. Development of a model for optimizing the parameters of induction butt welding of steel products using a flat inductor // *Vestnik ISEU*. – 2018. – No. 4.
25. Patent No. RU2193293C2. Induction heater for flat elongated surfaces: applied for in 2000 / S.K. Zeman, P.G. Babenko.
26. Patent No. RU 2833305 C1. Device for impulse forming of ultra-thin sheet materials: No. 2023125187; published 16.01.2025 / D.G. Chernikov, R.Yu. Yusupov, A.V. Kazakov.
27. Samokhvalov V.N., Chernikov D.G., Yusupov R.Yu. Efficiency Assessment of Air Channel Cooling of a Multi-Turn Coil for Magnetic Pulse Processing of Metals // *Russian Engineering Research*. – 2024. – Vol. 44. – No. 1. – P. 54-60.
28. Rosenbluth M.N., Furth H.P., Case K.M. Minimization of conductor surface heating by a pulsed magnetic field // *Journal of Applied Physics*. – 1974. – Vol. 45. – No. 3. – P. 1097-1099.
29. Patent № KR20150020753A. Cooling and oil churning rotor structure for induction motor: 2015 / K. Sangjin – 7 с.
30. Specht F.R. Water Cooling for Induction Systems // *Induction Heating and Heat Treatment/*

eds. V. Rudnev, G.E. Totten. – ASM International, 2014. – P. 714-720.

31. Kinev E.S., Tyapin A.A., Grishko G.S. Model of a cooling system for an induction device // International Scientific Research Journal. – 2019. – №11 (89).

32. Kukudzhanov K.V., Korznikova E.A., Chentsov A.V., Dmitriev S.V. A novel approach to determining the parameters of electric pulse healing of fatigue cracks // Materials Letters. – 2026. – Vol. 404. – P. 139565.

33. 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. – Vol. 59. – No. 5. – P. 3223-3234.

34. Morkina A.Y., Tarov D.V., Tatarinov P.S., Bebikhov Y.V., Korznikova E.A., Dmitriev S.V. Electric pulse treatment of grade 5 titanium alloy plates after bending to reduce springback effect // Mechanics of Solids. – 2025. – Vol. 60. – No. 3. – P. 2344-2352.

35. Tatarinov V.P., Tatarinov P.S., Semenov A.S., Bebikhov Y.V., Yakushev I.A., Dmitriev S.V. Development of the method for measuring large magnitude pulse currents for studying the electroplastic effect and its modeling // Proceedings - 2025 7th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2025. – 2025. – P. 967-971.

36. 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. – 2025. – Vol. 22. – No. 4. – P. 615-632.

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

38. Khalikova G.R., Korolkov O.E., Stolyarov V.V., Korznikova E.A., Dmitriev S.V. Competing deformation mechanisms of Grade 2 titanium under electrically assisted tension // Journal of Materials Research. – 2026. – Vol. 41. – No. 3. – P. 494-507.

39. Abdullina D.U., Kuzkin V.A., Krivtsov A.M., Kudreyko A.A., Dmitriev S.V. Heat transfer regimes and the electroplasticity effect: A molecular

dynamics study // Physical Review B. – 2025. – Vol. 112. – No.14. – P. 1443101-14431012.

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

### **Information about the authors**

*I.A. Shepelev – Senior Researcher in the Research Department of the Almet'yevsk State Technological University "Higher School of Oil."*

*A.I. Gabdullakhmatov – Software engineer, Competence Center for the Study of Complications and Interaction of Technologies in Oil Production Processes, Almet'yevsk State Technological University "Higher School of Oil".*

*A.Y. Morkina – postgraduate student at the Ufa State Petroleum Technological University and a Researcher at the Almet'yevsk State Technological University "Higher School of Oil".*

*I.S. Sugonyako – Postgraduate student, Engineer of the Reverse Engineering Center, Ufa State Petroleum Technological University.*

*E.A. Korznikova – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Dept. of Technological Machines and Equipment, Ufa State Petroleum Technological University.*

*D.G. Chernikov – an Associate Professor in the Department of Metal Forming at Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev.*

*V.A. Bryzgalov – a graduate student at Ufa University of Science and Technology, junior research associate at the "Metals and Alloys under Extreme Impacts" laboratory.*

*A.S. Semenov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher of the Laboratory "Solid State Physics" of the Institute of Molecule and Crystal Physics UFRS of RAS.*

*S.V. Dmitriev – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, a Researcher at the Almet'yevsk State Technological University "Higher School of Oil".*

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

Статья поступила в редакцию 02.05.2026; одобрена после рецензирования 25.05.2026; принята к публикации 01.06.2026.

The article was received by the editorial board on 02 May, 2026; approved after reviewing 25 May 2026; accepted for publication 01 Jun. 2026.