

## ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

УДК 621.3:539.3

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.53.101>**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ИНДУКТОРА ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ ТОКА В ПРОЦЕССАХ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОВ**

**А.П. Ращепкин\***, докт. техн. наук  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина,

e-mail: [anatoly\\_raschepkin@ukr.net](mailto:anatoly_raschepkin@ukr.net)

*Применительно к использованию электропластического эффекта в специальных методах пластической деформации, основанных на дополнительном воздействии на материал электрическим током, разработан индукционный (бесконтактный) метод возбуждения импульсов тока высокой плотности в обрабатываемом металле. Определение электрических параметров индуктора проведено компьютерным моделированием с использованием метода конечных элементов. В соответствии с технологическими процессами с непрерывным многократным повторением импульсов для исключения перегрева многовитковая обмотка торцевого цилиндрического индуктора выполнена из полого прямоугольного медного провода и водоохлаждаема. Возбуждение однополярного импульса тока осуществлено путем разряда конденсатора с использованием управляемого тиристора на индуктор. Нестационарные электромагнитные процессы разряда в цепи рассмотрены с использованием известных в теоретической электротехнике зависимостей, а распределение плотности тока в металле – при помощи метода конечных элементов. Библ.15, рис. 5.*

**Ключевые слова:** электропластическая деформация, электромагнитные параметры индуктора, однополярные импульсы тока, нестационарные разрядные процессы.

В процессе металлургического передела при пластической деформации металла возникает необходимость в его многократном межоперационном нагреве. Это требует значительных энергозатрат. В Институте электродинамики НАН Украины был разработан высокоэкономичный метод индукционного нагрева [1] бегущим магнитным полем. Совместно с Кировским заводом ОЦМ [2,3] были созданы линии протяжного отжига плоского проката металла, а также волочения сварных труб при изменении их типоразмеров, что позволило снизить удельные затраты энергии в 2 – 4 раза. Однако потребление электроэнергии на межоперационный отжиг для получения готового продукта осталось высоким. Присущее индукционным методам увеличение скорости нагрева холоднодеформированных металлов влияет на процессы разупрочнения и приводит к смещению рекристаллизации до более высоких температур, а также способствует получению более мелкозернистой и однородной по величине зерна структуры отожженного металла, что отмечалось, в частности, и в [2,3]. Экспериментальные исследования позволили установить [4] наиболее важные особенности структурного состояния холоднодеформированных металлов, связанные с характером их дислокационной структуры, которой отводится главная роль в объяснении природы изменения всех важнейших свойств металла в результате деформации и отжига. Холодная пластическая деформация металлов и сплавов сопровождается значительными внутренними изменениями: увеличением плотности дислокаций и вакансий, дроблением зерен на отдельные фрагменты, вытянутые по оси деформаций, возникновением множества дефектов – микротрещин толщиной в несколько периодов решетки, находящихся в упругом равновесии под действием внешних напряжений.

Основным условием для получения благоприятного структурного состояния при скоростном нагреве для разупрочнения холоднодеформированных металлов и сплавов является сокращение времени отжига за счет максимально высоких скоростей нагрева и минимальных изотермических выдержек. Но и это не приводит к заметному снижению энергозатрат в процессе металлургического передела.

В связи с энергетическим кризисом в середине прошлого века перед специалистами в области металлургии, являющейся основным потребителем электроэнергии, возникла проблема поиска новых энергосберегающих технологий производства металлов, в частности, путем использования электропластического эффекта, открытого столетием ранее, в 1856 году французским физиком Дюфором, обнаружившим, что прочность медной проволоки при пропускании электрического тока уменьшается, а стальной увеличивается. Сущность электропластического эффекта заключается в увеличении пластичности металла под действием импульсов электрического тока в процессах пластической деформации. В результате значительно уменьшается хрупкость металла, его сопротивление деформации и одновременно увеличивается пластичность. Таким образом, появляется возможность управлять механическими свойствами металлов, в частности, процессом обработки металлов давлением. Многочисленные виды обработки металлов давлением — ковка, штамповка, прокатка, волочение и т.д. — основаны на использовании весьма характерного для металлов свойства пластичности, т.е. способности необратимо деформироваться под действием приложенных напряжений. Если пропускать по деформируемым образцам ток высокой плотности  $10^8 - 10^9$  А/м<sup>2</sup>, то величина эффекта будет порядка десятков процентов. Экспериментально установлено, что электропластический эффект также линейно зависит от плотности тока (вплоть до  $10^9$  А/м<sup>2</sup>) и имеет большую величину при импульсном токе, а при переменном вообще не наблюдается.

Специальные методы деформации, основанные на дополнительном воздействии на материал током в условиях активного пластического деформирования, приводят к существенному облегчению пластической деформации.

Для описания электропластического эффекта можно использовать модель, предложенную в работе [5]. Включение импульсного тока в процессе активной деформации образцов приводит, как правило, к скачкообразному приращению деформации и связанному с этим скачком деформирующему усилию. Зависимость этого эффекта от амплитуды  $j_0$  и длительности  $t_u$  импульсов тока носит пороговый характер [6]. Порог по  $j_0$  [7] для различных металлов находится на уровне 250 – 400 А/мм<sup>2</sup>, а по  $t_u$  – на уровне 50 – 100 мкс. Эффект увеличивается с ростом  $j_0, t_u$  и частоты повторения импульсов тока [8, 9]. Протекание тока приводит к тому, что дислокации ускоряют своё движение под влиянием силы увлечения, которая в расчёте на единицу длины дислокации равна

$$F = jB / ne, \quad (1)$$

где  $B$  – коэффициент электрон-дислокационного взаимодействия;  $n$  – концентрация электронов проводимости;  $e$  – заряд электрона. При воздействии на дислокации силы (1) скачок деформации определяется выражением

$$d\varepsilon = f t_u q^2 V / 2KkT, \quad (2)$$

где  $K$  – коэффициент линейного упрочнения;  $q = jB / neb_b$ ;  $b_b$  – вектор Бюргерса. Здесь учтено, что энергия, передаваемая электроном дислокациям,  $V \ll kTq$ .

Самостоятельное, без воздействия внешних деформаций использование негреющих импульсов тока любой плотности не приводит к каким-либо заметным изменениям пластичности металлов. В области упругой деформации металлов импульсы тока не оказывают влияния на их пластичность. Замечено также существенное влияние на пластическую деформацию постоянного и переменного магнитного поля, физическая природа проявления которого еще недостаточно изучена [10].

Таким образом, для реализации электропластического эффекта в процессах пластической деформации необходимо использовать импульсы тока на уровне 250 – 400 А/мм<sup>2</sup> для различных металлов, а по  $t_u$  – на уровне 50 – 100 мкс при одновременном воздействии внешних деформаций. Ясно, что если бы такой ток был постоянным, то металл почти немедленно испарился бы за счет выделения джоулева тепла. Для устранения этого ток возбуждают очень короткими импульсами ( $\sim 100$  мкс) с низкой частотой повторения ( $\sim 1$  Гц).

Представленный анализ содержит фрагментарную оценку состояния научных разработок по использованию импульсного электродинамического воздействия на металлы с учетом электропластического эффекта.

Способность металлов необратимо деформироваться без сохранения заметных внутренних напряжений под действием приложенных внешних напряжений не позволяет, как уже отмечалось, изменять их механические свойства при воздействии только негреющими импульсами тока большой плотности. Вместе с тем в металлах с неоднородным распределением остаточных внутренних напряжений, например, в сварных швах [11] с большими остаточными растягивающими напряжениями или в поверхностно закаленных металлах возможно использование электропластического эффекта для снижения межзонных напряжений. В частности, в результате механических, тепловых и различного рода электромагнитных воздействий в поверхностном слое металлов происходят изменения в структуре, формируется определённое напряжённо-деформированное состояние материала приповерхностного слоя. Например, в приповерхностном слое [12] титановых образцов с нитридным покрытием наблюдаются большие остаточные сжимающие макронапряжения  $\sigma = -(2000-3000)$  МПа. Обработка образцов импульсом электрического тока  $j_m = 10^8$  А/м<sup>2</sup> и длительностью импульса 150 мкс изменяет глубину залегания остаточных макронапряжений как в материале покрытия, так и в материале подложки. Остаточные макронапряжения в покрытии TiN после второй обработки изменяются наиболее существенно и переходят в растягивающие. Вместе с тем электроимпульсная обработка [11] находит также все более широкое применение, так как кроме повышения пластичности при деформации влияет на напряженное состояние, статическую и усталостную прочность, трещинно- и коррозионную стойкость, а также ударную вязкость металлов и сплавов.

Поэтому целью работы является разработка бесконтактных, индукционных методов возбуждения в металлической полосе коротких импульсов тока большой плотности.

С учетом рассмотрения технологического процесса как непрерывного, с многократным повторением импульсов для исключения перегрева многовитковая обмотка индуктора выполняется водоохлаждаемой из полого прямоугольного медного провода ДПРХМ 5,0×5,0×1,0 БР М1 с электропроводностью  $5 \cdot 10^7$  См/м. Для примера расположение плоского цилиндрического индуктора над проводящей полосой показано на рис. 1.

При определении электромагнитных параметров индуктора в такой системе предполагалось, что толщина алюминиевой полосы с электропроводностью  $3,3 \cdot 10^7$  См/м принимает значения  $c = (2, 4, 6, 8)$  мм, расстояние между индуктором и пластиной с учетом величины витковой изоляции составляет  $d = (1, 2, 4, 6, 8)$  мм. Расстояние между витками и слоями индуктора с учетом величины витковой изоляции составляет  $\Delta i = 1$  мм. Внутренний  $r_1$  и наружный  $r_2$  радиусы индуктора также принимались неизменными и равными соответственно 10 и 58 мм. Число витков  $w = 16$  и число слоев индуктора  $n = 2$ . Сечение провода индуктора равно  $16 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>.

Выполненные расчеты вследствие отсутствия в системе сред с нелинейными электрофизическими свойствами показали, что индуктивность индуктора практически не зависит от величины его тока, а вносимое активное сопротивление слабо меняется с

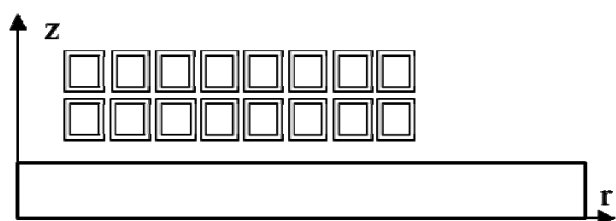


Рис. 1

изменением тока. В большей степени электрические параметры индуктора зависят от длительности импульса или от эквивалентной ей частоты тока индуктора и величины зазора между обрабатываемой пластиной и индуктором. Активное сопротивление индуктора возрастает с ростом резонансной частоты тока, но слабо зависит от величины зазора между индуктором и пластиной. В свою очередь индуктивность индуктора практически не зависит от частоты тока и толщины алюминиевой полосы, но существенно зависит от величины зазора между индуктором и пластиной.

Электрические параметры индуктора (рис.1) определялись компьютерным моделированием методом конечных элементов [13] при питании обмотки синусоидальным током заданной амплитуды  $I_e$  и различной частоты (от 500 до 10000 Гц). В частности, при  $I_e = 11200\text{А}$ ,  $f = 1000$  Гц,  $d = 4$  и  $c = 8$  мм комплексная амплитудная величина напряжения обмотки составляет  $u = 36,7 + 452,6 i$ . Тогда активное сопротивление индуктора равно

$$r = \frac{\text{Re}(u)}{I_e} + \frac{w \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0.33}{5 \cdot 10^7 \cdot (5+3) \cdot 2 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} kr = 0,0165. \quad (3)$$

Здесь коэффициент дополнительных потерь по [14] равен

$$kr = 1 + \frac{h^4}{\delta^4} \left( \frac{w \cdot b}{(b + \Delta i) \cdot w + 4 \cdot r1} \right)^2 \frac{n^2 - 0.2}{9} = 3,18; \quad (4)$$

$$\delta = 10^3 \sqrt{2 / \mu \sigma 2 \pi f},$$

где  $h$  и  $b$  – высота и ширина провода обмотки индуктора.

Применительно к полым прямоугольным проводам коэффициент  $kr$  может быть также найден по формуле

$$kr = 1 + \frac{2 \cdot \Delta \cdot h^2}{\delta^3} \left( \frac{w \cdot b}{(b + \Delta i) \cdot w + 4 \cdot r1} \right)^2 \frac{n^2 - 0.25}{3} \left( 1 + \frac{h - 2 \cdot \Delta}{b} \right)^2 (1 - e^{-2 \cdot \Delta / \delta}) = 2,75, \quad (5)$$

где  $\Delta = 1\text{мм}$  – толщина стенки прямоугольного провода индуктора.

Индуктивность индуктора равна

$$L = \frac{\text{Im}(u)}{I_e \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} = 6,43 \text{ мкГн}. \quad (6)$$

Таким же образом определяются электрические параметры индуктора при других конструктивных исполнениях, величинах  $I_e, f, d, c$  и электрофизических свойствах индукционной системы.

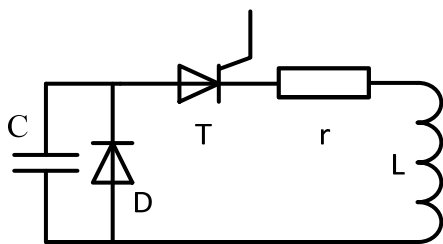


Рис. 2.

Импульсы электрического тока в индукторе, как и в проводящей полосе, получают путем разряда предварительно заряженного до напряжения  $U$  конденсатора емкостью  $C$  на электрическую цепь (рис.2), обладающую найденными сопротивлением  $r$  и индуктивностью  $L$ .

Для определения тока в этой цепи исходим из основного дифференциального уравнения [15]

$$L \frac{di}{dt} + r \cdot i + \frac{g}{C} = 0, \quad g = g(0) + \int_0^t i \cdot dt, \quad (7)$$

где  $g$  – заряд конденсатора.

После дифференцирования его по времени приходим к уравнению второго порядка

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + r \frac{di}{dt} + \frac{i}{C} = 0, \quad (8)$$

характеристическое уравнение которого имеет два корня:

$$\gamma_{1,2} = -\frac{r}{2L} \pm \sqrt{\frac{r^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}, \quad \alpha = \frac{r}{2L}, \quad \omega_0^2 = \frac{1}{LC}. \quad (9)$$

Следовательно, решение уравнения (8) содержит две постоянных интегрирования, для определения которых необходимы два начальных условия. Первым условием является допущение, что ток в цепи в начальный момент времени равен нулю. Второе условие предполагает, что начальное напряжение конденсатора равно  $U = g(0)/C$  и при  $t = 0$ , согласно уравнению (7),  $di/dt = -U/L$ .

С учетом указанных начальных условий разрядный ток в индукторе описываем зависимостью

$$i = -\frac{U}{2L\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}}(e^{\gamma_1 t} - e^{\gamma_2 t}). \quad (10)$$

Так как в исходном положении принято, что  $f = 1000$  и  $\omega_0 = 2\pi f$ , то емкость конденсатора равна

$$C = 1/\omega_0^2 L = 0,00394 \Phi.$$

Процесс разряда конденсатора зависит от соотношения между параметрами цепи  $r, L, C$ , определяющими в итоге будут ли корни характеристического уравнения вещественными или комплексными, т.е. будет ли разряд апериодическим или затухающим колебательным. В реальных условиях следует учесть в параметрах цепи также влияние сопротивления тиристора и соединительных ветвей, параметры которых зависят от конкретного их исполнения. В нашем примере ограничимся лишь параметрами индуктора. При комплексных корнях характеристического уравнения ток индуктора принимает вид

$$i = -\frac{U}{\omega l \cdot L} \sin(\omega l \cdot t) \cdot e^{-\alpha \cdot t}, \quad (11)$$

где  $\alpha = 1280$ ,  $\omega l = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} = 6151$  – угловая частота собственных затухающих колебаний. Полагая, что в исходном состоянии конденсатор был заряжен до напряжения  $U = 850 \text{ В}$ , находим величину импульса плотности тока в обмотке индуктора

$$j_e = J_0 \cdot e^{-\alpha \cdot t} \sin(\omega l \cdot t) \cdot \theta(T_1 - t), \quad (12)$$

в котором путем введения единичной обобщенной функции  $\theta(\cdot)$  учтено, что при отсутствии шунтирующего диода тиристор закрывается при переходе тока через нуль, и ток в индукторе изменяется в соответствии с кривой (Т) (рис.3). Здесь длительность импульса равна  $T_1 = \pi/\omega l = 512,4 \text{ мкс}$ , а  $J_0 = U/(\omega l \cdot L \cdot 16 \cdot 10^{-6}) = 1,343 \cdot 10^9 \text{ А/м}^2$ .

В процессе разряда напряжение конденсатора уменьшается и достигает нуля при

$$T_2 = \frac{\pi/2 + \arctan(\alpha/\omega l)}{\omega l}. \quad (13)$$

При этом диод открывается, что приводит к апериодическому переходному процессу только в цепи индуктора, в результате чего ток в индукторе изменяется согласно кривой (Т+D) (рис.3) с начальной плотностью тока в индукторе  $J_1 = J_0 \cdot e^{-\alpha T_2} \sin(\omega l \cdot T_2) = 9,084 \cdot 10^8$ .

Таким образом, изменение во времени плотности тока в индукторе описывается зависимостью

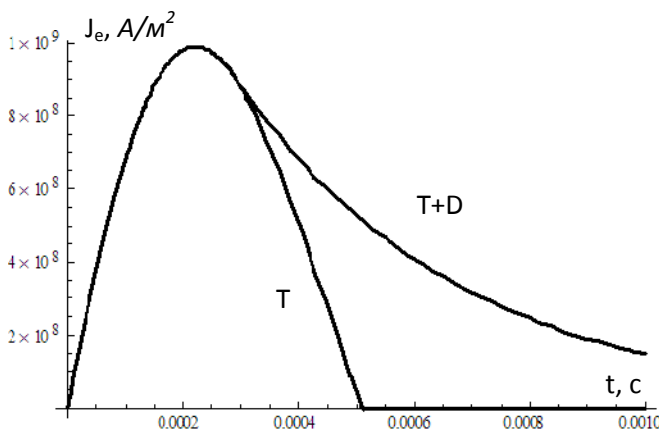


Рис. 3

$$j_e = J_0 \cdot e^{-\alpha \cdot t} \sin(\omega l \cdot t) \cdot \theta(T_2 - t) + J_1 \cdot e^{-2 \cdot \alpha \cdot (t - T_2)} \cdot \theta(t - T_2) \quad (14)$$

Путем изменения емкости конденсатора можно управлять величиной резонансной частоты  $f_{LC}$ -контура и соответственно длительностью импульса. Однако с увеличением резонансной частоты контура для всех размеров принятого конструктивного исполнения

индукционной системы в связи с резким возрастанием активного сопротивления индуктора и практически неизменной от нее индуктивности уже при частотах, превышающих 5 кГц, разряд конденсатора переходит в аperiodический с существенным уменьшением максимального тока.

Впрочем, и при периодическом затухающем разряде и постоянном начальном напряжении конденсатора с ростом частоты непрерывно уменьшается амплитуда импульса тока, что не позволяет возбудить плотность тока требуемой величины в обрабатываемой полосе с меньшей 130 мкс длительностью импульса тока.

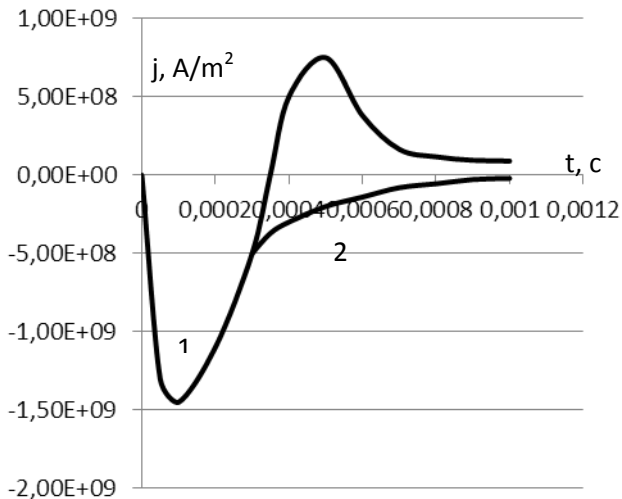


Рис.4

Применение шунтирующего конденсатор диода, приводящего к аperiodическому переходному процессу только в цепи индуктора, не приводит к изменению картины распределения плотности тока в полосе и практически полностью повторяет разряд с однополярным импульсом тока индуктора (рис.4).

Амплитуда импульса тока в любом режиме разряда и, следовательно, уровень индуцированной в полосе плотности тока регулируются величиной начального напряжения конденсатора  $U$ . Необходимые для реализации электропластического эффекта большие плотности тока приводят к возникновению значительного силового взаимодействия между индуктором и обрабатываемой пластиной.

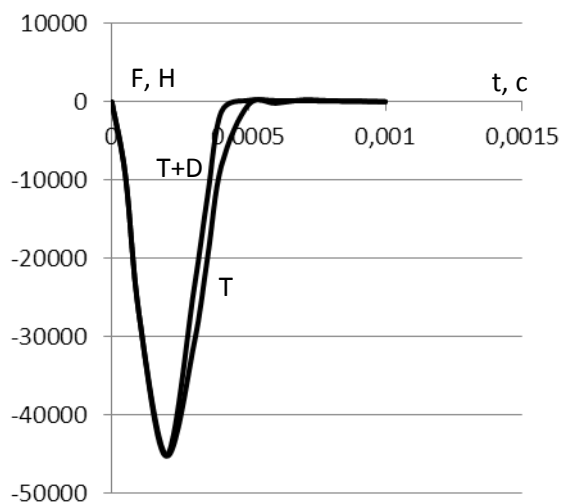


Рис. 5

Возникновение значительного силового взаимодействия между индуктором и обрабатываемой пластиной требует разработки способов повышения механической прочности для многвитковых индукторов.

Определив временную зависимость тока в обмотке (12, 14), можем теперь изучить нестационарные электромагнитные процессы в индукторе. На рис. 4 кривой 1 показано изменение амплитуды плотности тока во времени на поверхности обрабатываемой полосы. Как видно, не представляется возможным возбудить в полосе однополярный импульс плотности тока однополярным импульсом тока индуктора. Вместе с тем именно таким не однополярным индуцированным импульсом плотности тока в [12] удалось устранить макронапряжения в титановом образце и после второго импульса даже перевести их в растягивающие. Распространяясь вглубь полосы, амплитуда волны отрицательной плотности тока убывает в соответствии с кривой 2.

На рис. 5 приведена величина  $z$  – составляющей силы, действующей на обрабатываемую пластину по схеме включения только с тиристором (Т) и с использованием шунтирующего диода (Т+D) в зависимости от времени взаимодействия.

**Выводы.** Индукционными методами бесконтактным способом можно возбудить в обрабатываемой пластине импульсы плотности тока как при периодических затухающих, так и аperiodических режимах разряда конденсатора.

Использование опорного шунтирующего конденсатор диода не влияет на характер распределения индуцированных в пластине импульсов плотности тока.

Фінансується за рахунок держбюджетної теми «Розвиток теорії електрофізичних процесів в імпульсних системах електрофізичної обробки електропровідних середовищ» (шифр «Бар'єр 2»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ Президії НАН України 04.07.2017 р., протокол № 2. Державний реєстраційний номер теми 0117U007714.

1. Ращепкин А.П., Кондратенко И.П. Методологические основы анализа электромагнитных процессов в линейных индукционных машинах. Киев.: ИЭД НАН Украины. 2017. 355с.
2. Широков Н.М., Крутилин В.А., Певзнер М.З., Юткин В.М. Опыт использования индукционного протяжного отжига в практике обработки цветных металлов. *Цветные металлы*. 1989. № 1. С. 101 – 103.
3. Ращепкин А.П., Крутилин В.А., Виштак П.А., Кондратенко И.П., Зинченко Т.Р. Индукционный метод нагрева проката из цветных металлов и сплавов. *Цветные металлы*. 1989. № 1. С. 104 – 107.
4. Гриднев В.Н., Трефилов В.И. Фазовые и структурные превращения и метастабильные состояния в металлах. Киев: Наукова думка, 1988. 264 с.
5. Рощупкин А. М., Троицкий О. А., Спицын В. И. Развитие концепции о действии тока высокой плотности на пластическую деформацию металла. *ДАН СССР*. 1986. Том 286. № 3. С. 633 – 636.
6. Зуев Л. Б., Громов В.Е., Курилов В.Ф., Гуревич Л.И. Подвижность дислокаций в монокристаллах цинка при действии импульсов тока. *ДАН СССР*. 1978. Том 239. № 1. С. 84 – 86.
7. Корж В.Н., Герцрикен Д.С., Лопата Л.А., Хомяковский Ю.Л. Влияние электропластического эффекта на диффузионные процессы в деформируемых металлах. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2010. Вип. 23. С. 326 – 329.
8. Троицкий О. А., Спицын В. И., Стащенко В. И. Влияние основных параметров тока на величину электропластического эффекта. *ДАН СССР*. 1981. Том 256. №5. С. 1134 – 1137.
9. Троицкий О. А., Спицын В. И., Моисеенко М. М. Влияние серий электрических импульсов на пластическую деформацию металлов. *ДАН СССР*. 1984. Том 274. № 3. С. 587 – 591.
10. Васильев М. А. Особенности пластической деформации металлов и сплавов в магнитном поле. *Обзор. Успехи физики металлов*. 2007. Т. 8. С. 65 – 105.
11. Лобанов Л. М., Пашин Н. А., Логинов В. П., Логинова Ю. В. Применение электроимпульсной обработки элементов конструкций с целью повышения их ресурса. *Обзор. Автоматическая сварка*. 2005. № 11. С. 26 – 30.
12. Сейдаметов С.В., Лоскутов С.В. Влияние импульсной электромагнитной обработки на структурные перестройки сплава титана ВТЗ-1. *Журнал физики и инженерии поверхности*. 2016. Том 1. № 1. С. 4 – 8.
13. Comsol multiphysics modeling and simulation software.  
URL: <http://www.comsol.com/> (дата звернення: 20.04.2019)
14. Постников И.М. Проектирование электрических машин. Киев.: Гос. изд. тех. лит. УССР. 1962. 736 с.
15. Нейман Л.Р., Калантаров П.Л. Теоретические основы электротехники, Ч.2. Москва-Ленинград: ГЭИ. 1959. 444 с.

УДК 621.3:539.3

## ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПАРАМЕТРИ ІНДУКТОРА ДЛЯ ЗБУДЖЕННЯ ІМПУЛЬСІВ СТРУМУ В ПРОЦЕСАХ ЕЛЕКТРОПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ МЕТАЛІВ

**А.П.Ращепкін**, докт. техн. наук  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна  
e-mail: [anatoly\\_raschepkin@ukr.net](mailto:anatoly_raschepkin@ukr.net)

Для використання електропластичного ефекту в спеціальних методах пластичної деформації, заснованих на додатковому впливі на метал струмами високої щільності, розроблено індукційний (безконтактний) метод збудження в оброблюваному металі імпульсів струму високої щільності. Визначення електричних параметрів індуктора виконувалось комп'ютерним моделюванням з застосуванням метода скінченних елементів. Відповідно до технологічних процесів з безперервним, багаторазовим повторенням імпульсів для усунення перегрівання багатовиткова обмотка торцевого циліндричного індуктора виконана водоохолоджуваною з порожнистого прямокутного мідного проводу. Збудження однополярного імпульсу струму здійснюється шляхом розряду конденсатора на індуктор з використанням керованого тиристора. Нестационарні електромагнітні процеси в розрядному колі розглянуто з використанням відомих у теоретичній електротехніці залежностей, а розподіл щільності струму в металі – застосуванням методу скінченних елементів. Бібл.15, рис. 5.

**Ключові слова:** електропластична деформація, електромагнітні параметри індуктора, однополярні імпульси струму, нестационарні розрядні процеси.

## ELECTROMAGNETIC PARAMETERS OF THE INDUCTOR FOR EXCITATION OF CURRENT PULSES IN THE PROCESSES OF ELECTROPLASTIC DEFORMATION OF METALS

**A. P. Rashchepkin**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

E-mail: [anatoly\\_raschepkin@ukr.net](mailto:anatoly_raschepkin@ukr.net)

*With reference to the use of the electroplastic effect in special methods of plastic deformation, based on the additional effect of high-density current on the material, an induction method has been developed for the excitation of high-density current pulses in a processed metal. The electrical parameters of the inductor were determined by computer simulation using the finite element method. With respect to technological processes with continuous, repeated repetition of pulses, in order to avoid overheating, the multi-turn winding of the end cylindrical inductor is performed by a water-cooled coil made of a hollow rectangular copper wire. Excitation of a unipolar current pulse was carried out by discharging a capacitor using a controlled thermistor to an inductor. No stationary electromagnetic processes of discharge in the circuit are considered using the known dependences in theoretical electrical engineering, and the distribution of the current density in the metal by the finite element method. References 15, figures 5.*

Key words: electroplastic deformation, electromagnetic parameters of the inductor, unipolar current pulses, non-stationary discharge processes.

1. Rashchepkin A.P., Kondratenko I.P. Methodological bases of the analysis of electromagnetic processes in linear induction machines. Kyiv.: IED NAN Ukrainy. 2017. 355 p. (Rus)
2. Shirokov N.M., Krutilin V.A., Pevzner M.Z., Yutkin V.M. Experience of using induction long annealing in the practice of processing non-ferrous metals. *Non-ferrous metals*. 1989. No 1. Pp. 101 – 103. (Rus)
3. Rashchepkin A.P., Krutilin V.A., Vishtak P.A., Kondratenko I.P., Zinchenko T.R. Induction method for heating rolled products from non-ferrous metals and alloys. *Non-ferrous metals*. 1989. No 1. Pp. 104 – 107. (Rus)
4. Gridnev V.N., Trefilov V.I. Phase and structural transformations and metastable states in metals. K: Naukova Dumka, 1988. 264 p. (Rus)
5. Roshchupkin A.M., Troitsky O.A., Spitsyn V.I. Development of the concept of the effect of a high-density current on the plastic deformation of a metal. *DAN SSSR*. 1986. Volume 286, No 3. Pp. 633 – 636. (Rus)
6. Zuev L.B., Gromov V.E., Kurilov V.F., Gurevich L.I. Mobility of dislocations in single crystals of zinc under the action of current pulses. *DAN SSSR*. 1978. Vol. 239. No 1. Pp. 84 – 86. (Rus)
7. Korzh V.N., Gertsriken D.S., Lopata L.A., Khomyakovskiy Yu.L.. Effect of the electroplastic effect on diffusion processes in deformable metals. *Collection of scientific works of Kirovograd National Technical University. Engineering in agricultural production, branch engineering, automation*. 2010. V. 23. Pp. 326 – 329. (Rus)
8. Troitsky O.A., Spitsyn V.I., Stashenko V.I. Influence of the main current parameters on the magnitude of the electroplastic effect. *DAN SSSR*. 1981. Volume 256. No 5. Pp. 1134 – 1137. (Rus)
9. Troitsky O.A., Spitsyn V.I., Moiseenko M.M. Influence of series of electrical impulses on the plastic deformation of metals. *DAN SSSR*. 1984. Vol. 274. No 3. Pp. 587 – 591. (Rus)
10. Vasiliev M.A. Features of plastic deformation of metals and alloys in a magnetic field. Overview. *Advances in the physics of metals*. 2007. V. 8. Pp. 65 – 105. (Rus)
11. Lobanov L.M., Paschin N.A., Loginov V.P., Loginova Yu. V. Application of electric impulse processing of structural elements for the purpose of increasing their resource. Overview. *Automatic welding*. No 11. Pp. 26 – 30. (Rus)
12. Seidametov S.V., Loskutov S.V. Influence of pulsed electromagnetic treatment on structural rearrangements of titanium alloy VT3-1. *Journal of Physics and Surface Engineering*. 2016. V. 1. No 1. Pp. 4 – 8. (Rus)
13. Comsol multiphysics modeling and simulation software. <http://www.comsol.com/> (accessed: 20.04.2019).
14. Postnikov I.M. Designing of electrical machines. Kyiv. 1962. 736 p. (Rus)
15. Neiman L.R., Kalantarov P.L. Theoretical Foundations of Electrical Engineering, Part 2. M-L: SEI. 1959. 444 p. (Rus)

Надійшла 25.03.2019

Received 25.03.2019