

В. С. Савенко¹, О. А. Троицкий², А. Г. Силивонец¹

¹*Мозырский государственный педагогический университет имени И. П. Шамякина, Мозырь, Беларусь*

²*Институт машиноведения имени А. А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия*

ВКЛАД ПОНДЕРОМОТОРНЫХ ФАКТОРОВ В РЕАЛИЗАЦИЮ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Рассмотрены теоретические аспекты реализации электропластической деформации для динамического пинч-эффекта в упругой пластической деформации металлов с участием собственного магнитного поля тока. Перераспределение напряженности магнитного поля H в приповерхностных слоях металла обуславливает пондеромоторные явления в виде динамического пинч-эффекта, который помимо электронно-пластического действия импульсного тока приводит к сжатию образцов собственным магнитным полем и возбуждению упругих колебаний остова кристаллической решетки с частотой следования импульсов тока на фронте их нарастания. Динамический пинч-эффект создает ультразвуковую вибрацию решеточной системы, при этом изменяется кинетика и стимулируется пластическая деформация за счет увеличения амплитуды колебаний прямолинейных дислокаций и периодического изменения позиции дислокационных петель с увеличением вероятности отрыва дислокаций от стопоров. При деформации выше предела текучести за счет пинч-эффекта собственное магнитное поле тока диффундирует в кристалл, при этом скорость диффузии зависит как от проводимости металла, так и от частоты тока. При одной и той же геометрии образцов пинч-эффект выражен сильнее на материалах с высокой электропроводностью. Для практического использования технологии электропластической деформации, особенно при обработке металлов давлением при волочении, прокатке и так далее, необходимо учитывать физические условия создания пондеромоторных эффектов применительно к конкретным технически важным материалам.

Ключевые слова: электропластическая деформация, пондеромоторное действие тока, пинч-эффект, скин-эффект, собственное магнитное поле, вихревое электрическое поле, импульсный ток.

V.S. Savenko¹, O.A. Troickij², A.G. Silivonec¹

¹*I.P. Shamyakin Mozyr State Pedagogical University, Mozyr, Belarus*

²*A.A. Blagonravov Institute of Engineering of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

THE CONTRIBUTION OF PONDEROMOTIVE FACTORS IN IMPLEMENTATION OF ELECTROPLASTICITY DEFORMATION

Theoretical aspects of the implementation of electroplastic deformation for dynamic pinch-effect at elastic-plastic deformation of metals with the participation of self-magnetic field of current are considered. The redistribution of magnetic field intensity H in the surface layers of metal leads to ponderomotive effects in the form of dynamic pinch effect, which in addition to the electron-plastic action of the pulse current leads to a compression of the sample intrinsic magnetic field and the excitation of elastic vibrations of the skeleton of the crystal lattice, with a repetition frequency of current pulses at the front of their rise. Dynamic pinch effect creates ultrasonic vibration of the lattice system, thus changing the kinetics, and induced plastic deformation due to the increase of the oscillation amplitude of rectilinear dislocations and periodic changes of the position of the dislocation loops with a higher probability of detachment of dislocations from stoppers. At deformation above the yield limit, due to the pinch effect, magnetic field of a current diffuses into crystal, thus the rate of diffusion depends on the conductivity of the metal and the frequency of the current. At the same geometry of the samples, the pinch effect is stronger for materials with high electrical conductivity. For practical use of the technology of electroplastic deformation, especially in the processing of metals by pressure by drawing, rolling and so on, it is necessary to consider physical conditions of the creation of the ponderomotive effects in relation to particular technologically important materials.

Keywords: electroplastic deformation, the ponderomotive action of current, pinch effect, skin effect, magnetic field, vortex electric field, pulsed current.

Введение. Основные фундаментальные и прикладные направления развития современного физического материаловедения состоят в создании высокоинтенсивных технологий для получения материалов с комплексом высоких физико-механических свойств.

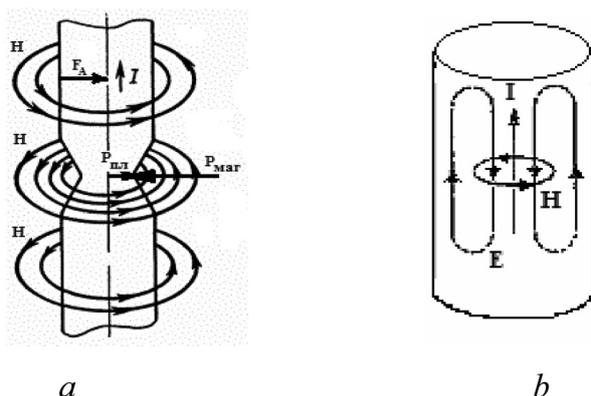


Рис. 1. Модель пондеромоторного пинч-действия импульсного тока (а) и вытеснение переменного тока на поверхности образца (b): H – магнитное поле тока, E – вызываемое вихревое электрическое поле

Fig. 1. A model of ponderomotive pinch action of pulse current (a) and an alternating current displacement on the sample surface (b): H – magnetic field of a current, E – induced vortex electric field

ных эффектов сжатием электронной плазмы магнитным полем, индуцированным протекающим током, при этом существенно изменяется кинетика пластической деформации.

В работе рассмотрены теоретические аспекты реализации электропластической деформации, с учетом пондеромоторных факторов, пинч-действия импульсного тока плотностью $J_m = 10^3$ А/мм², длительностью 10^{-4} с для динамического пинч-эффекта в упругой пластической деформации металлов с участием собственного магнитного поля тока (рис. 1).

Возбуждение электронной подсистемы металла, нагруженного выше предела текучести, короткими импульсами тока порядка $\tau \sim 10^{-4}$ с, обуславливает появление собственного магнитного поля в виде кольцевых линий вокруг электронной плазмы движущихся зарядов линий тока, смещая их к оси образца в поперечном направлении под действием поля Холла, силы Ампера (рис. 1, а). В результате перераспределение напряженности магнитного поля H в приповерхностных слоях металла обуславливает пондеромоторные явления в виде динамического пинч-эффекта, который помимо электронно-пластического действия импульсного тока приводит к сжатию образцов собственным магнитным полем и возбуждению в них упругих колебаний остова кристаллической решетки с частотой следования импульсов тока на фронте их нарастания. Динамический пинч-эффект создает ультразвуковую вибрацию решеточной системы, при этом изменяется кинетика и стимулируется пластическая деформация за счет увеличения амплитуды колебаний прямолинейных дислокаций и периодического изменения позиции дислокационных петель с увеличением вероятности отрыва дислокаций от стопоров [1–2, 5–8].

Рассмотрим пондеромоторные факторы, возникающие от собственного магнитного поля и электрического поля внутри проводника при реализации электропластической деформации.

Постоянное электрическое поле в проводнике существует только при наличии тока и поддерживается внешним источником электродвижущей силы. Из закона Фарадея $\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$ следует, что источником электродвижущей силы служит изменяющийся магнитный поток, порождающий вихревое электрическое поле с возникновением токов Фуко, которые экранируют переменное магнитное поле так, что оно не проникает вглубь проводника (рис. 1, b). В то же время токи Фуко не могут экранировать статическое магнитное поле бесконечно с учетом омического сопротивления проводника. Как следствие, статическое магнитное поле свободно проникает вглубь проводника, причем чем быстрее изменяется магнитное поле, тем меньше глубина. В проводниках, у которых омические потери малы, уменьшение глубины проникновения поля становится заметным при умеренных частотах [3–5].

Решение этой задачи реализуется при электропластической деформации металлов в условиях возбуждения электронной подсистемы высокоэнергетическими воздействиями с целью программированного управления деформационными процессами для получения модифицированных свойств материалов с высокими служебными характеристиками.

В настоящем исследовании, в отличие от практикуемых известных структурных и механико-термических воздействий на кристаллическую решетку при обработке металла давлением, рассматривается новый путь управления пластической деформацией с помощью немеханических сил. Импульсы тока большой плотности, пропущенные через металл, нагруженный выше предела текучести при реализации электропластической деформации, обуславливают возникновение пондеромотор-

Расчет магнитного поля в образце в условии электропластичности. Под влиянием собственного магнитного поля тока, которое кольцевыми линиями охватывает проводник (деформируемый образец), возникает поляризация электронной подсистемы металла и, как следствие, появление поперечного электрического поля Холла, препятствующего дальнейшему сжатию электронной плазмы.

Рассмотрим уравнение, $\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{c^2}{4\pi\sigma\mu} \nabla^2 H$, которое согласуется с уравнением диффузии $\frac{\partial n}{\partial t} = D \nabla^2 n$. Выбрав проекцию на ось Z , запишем в виде

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = D_M \frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где $D_M = \frac{c^2}{4\pi\sigma\mu}$ – коэффициент магнитной диффузии, c – электродинамическая постоянная, μ – магнитная проницаемость, σ – удельная проводимость.

Так как поле вне образца изменяется по гармоническому закону, следующая Z проекция магнитного поля внутри образца будет

$$H_z(0, t) = H_0 \cos(\omega t) \quad (2)$$

на границе при $x = 0$. Гармоническая зависимость (2) характеризует так называемый стационарный скин-эффект [6].

Поскольку уравнение (1) линейно и содержит вещественные коэффициенты, то следующие выкладки можно упростить, перейдя к комплексной записи. Таким образом, будем искать решение другой вспомогательной задачи с заменой $\cos(\omega t)$ на комплексную экспоненту:

$$H_z(0, t) = H_0 e^{-i\omega t}. \quad (3)$$

Решение исходной задачи с вещественным полем можно получить из решения вспомогательной задачи с комплексным полем путем отделения вещественной части. Поскольку магнитное поле вне образца пропорционально $e^{-i\omega t}$, предположим, что решение вспомогательной задачи следует искать в виде

$$H_z(x, t) = H(x) e^{-i\omega t}. \quad (4)$$

Подставляя зависимость (4) в уравнение с частными производными (1), можно получить обыкновенное дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2 H}{dx^2} = -\frac{2i}{\delta^2} H, \quad (5)$$

где $\delta = \sqrt{\frac{2D_M}{\omega}} = \frac{c}{\sqrt{2\pi\sigma\mu\omega}}$ имеет размерность длины.

Общее решение обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами находится в виде суммы экспонент $\mathbb{A} e^{ikx}$ с постоянными коэффициентами \mathbb{A} и k^2 . Коэффициент k находится постановкой e^{ikx} в уравнение (4). Алгебраическое уравнение $k^2 = \frac{2i}{\delta^2}$ имеет два корня $k_{\pm} = \pm \frac{1+i}{\delta}$. Один из них k_+ отвечает убывающему, а другой – нарастающему к оси образца (при $x \rightarrow \infty$) переменному магнитному полю. Нарастающее в радиальном направлении магнитное поле следует опустить, так как оно отвечает бессмысленному увеличению магнитного поля вплоть до бесконечного значения при удалении от источника. Таким образом, внутри проводника решение вспомогательной задачи имеет вид

$$H_z(x, t) = \mathbb{A} e^{-\frac{(1-i)x}{\delta}} e^{-i\omega t}. \quad (6)$$

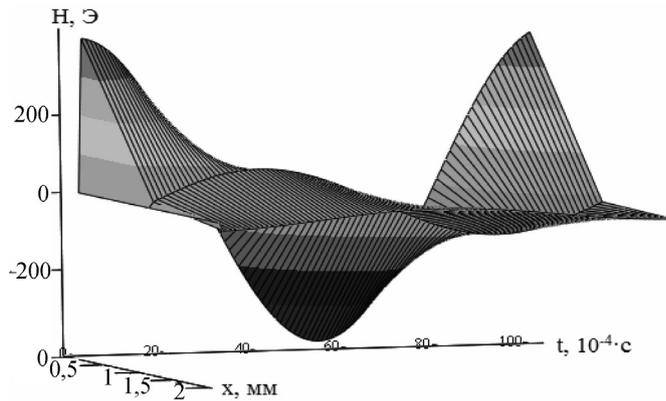


Рис. 2. Изменение магнитного поля в образце магния при $\nu = 600$ Гц
 Fig. 2. The change of magnetic field in magnesium sample at $\nu = 600$ Hz

Коэффициент Δ можно найти из условия непрерывности тангенциальной проекции напряженности магнитного поля на границе образца при $x = 0$. Поскольку вне проводника при $x = 0$ напряженность магнитного поля изменяется по закону $H_z(0, t) = H_0 e^{-i\omega t}$, заключаем, что $\Delta = H_0$. Следовательно,

$$H_z(x, t) = H_0 e^{-\frac{(1-i)x}{\delta}} e^{-i\omega t}. \quad (7)$$

Определяя вещественную часть комплексной функции $H_z(x, t)$, найдем вещественное магнитное поле в образце:

$$H_z(x, t) = H_0 e^{-\frac{x}{\delta}} \cos\left(\omega t - \frac{x}{\delta}\right), \quad (8)$$

где δ толщина скин-слоя [5].

Для определения значения магнитного поля, возникающего от пондеромоторных факторов при электропластической деформации 35 переходной прокаткой образцов магния, воспользуемся программой Mathcad Professional с учетом конечных параметров последнего перехода деформационного магния: $s = 4$ мм – площадь поперечного сечения образца; $r = 2$ мм – радиус сечения образца; $j = 10^3$ А/мм² – плотность тока; $\tau = 10^{-4}$ с – длительность импульса; $\nu = 600$ Гц – частота; $\sigma = 22,7 \cdot 10^3$ См/мм – удельная проводимость магния.

Как видно из графика на рис. 2, в образце деформационного магния с конечными параметрами на последнем переходе наблюдается изменение магнитного поля, причем при перемещении от центра к поверхности образца напряженность магнитного поля увеличивается и достигает значения $H = 400$ Э, на расстоянии 1 мм от центра поперечного сечения образца напряженность магнитного поля принимает значение $H = 100$ Э.

Расчет электрического поля и плотности тока в образце в условиях электропластичности. Для расчета электрического поля, возникающего от вторичных пондеромоторных факторов в образце, воспользуемся уравнением

$$\text{rot } H = \frac{1}{c} \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} j, \quad (9)$$

в котором опустим ток смещения и запишем в виде

$$\text{rot } H = \frac{4\pi}{c} j. \quad (10)$$

С учетом закона Ома $j = \sigma E$ выразим напряженность электрического поля в виде

$$E = \frac{c}{4\pi\sigma} \text{rot } H. \quad (11)$$

Подставив в (11) зависимость напряженности магнитного поля (7), заключаем, что электрическое поле имеет только y компоненту:

$$E_y = (1-i) \sqrt{\frac{\omega\mu}{8\pi\sigma}} H_z. \quad (12)$$

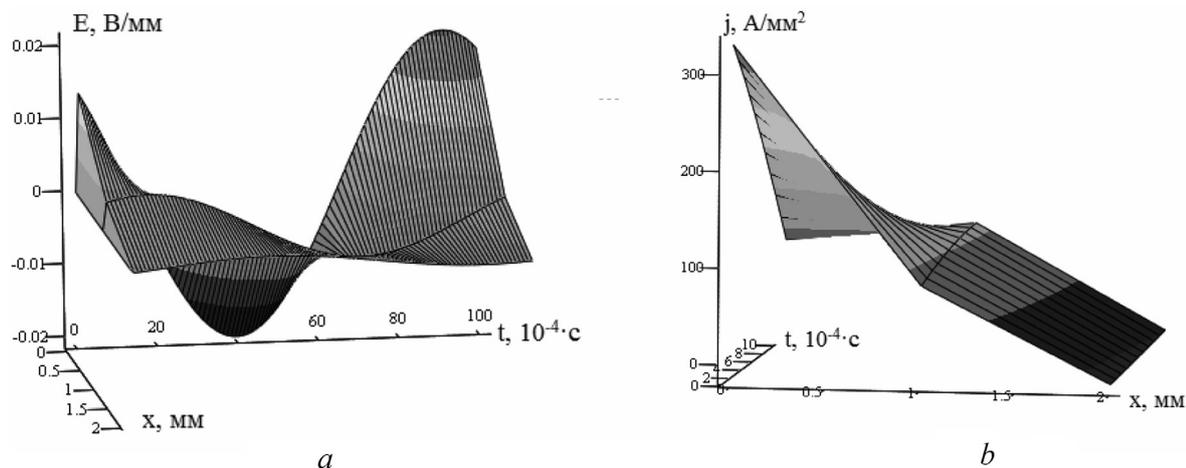


Рис. 3. Распределение электрического поля (а) и плотности тока (б) в образце деформационного магния в условиях электропластичности при $\nu = 600$ Гц

Fig. 3. The distribution of electric field (a) and current density (b) of magnesium in deformed sample under electroplasticity at $\nu = 600$ Hz

Учтем Z компоненту магнитного поля H_z из формулы (7) и, выделив вещественную часть, получим

$$E_y(x, t) = \sqrt{\frac{\omega\mu}{4\pi\sigma}} H_0 e^{-\frac{x}{\delta}} \cos\left(\omega t - \frac{x}{\delta} + \frac{\pi}{4}\right). \quad (13)$$

Умножая полученный результат на σ , найдем распределение плотности тока в образце [5]:

$$j_y(x, t) = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{4\pi}} H_0 e^{-\frac{x}{\delta}} \cos\left(\omega t - \frac{x}{\delta} + \frac{\pi}{4}\right). \quad (14)$$

С помощью программы Mathcad Professional построим распределение электрического поля и плотности электрического тока при вторичных пондеромоторных факторах в явлении электропластичности деформационного магния с параметрами последнего технологического перехода (рис. 3).

Из графиков видно (рис. 3, а), что напряженность электрического поля изменяется от оси к стенкам и достигает максимального значения $E = 0,025$ В/мм на расстоянии в 1 мм от центра поперечного сечения образца, при этом напряженность магнитного поля принимает значение $H = 0,005$ А/мм. Плотность тока будет таким же образом неравномерно распределяться по сечению образца. Как видно из рис. 3, б, при перемещении от центра к поверхности образца плотность тока увеличивается и достигает максимального значения $j = 400$ А/мм².

Выводы. Импульсный ток большой плотности, пропущенный через металл во время деформации выше предела текучести, помимо электронно-пластического действия оказывает и пондеромоторное действие на деформируемый материал, обуславливая механические напряжения. При действии поперечного поля Холла на ионный остов кристаллической решетки металла с периодичностью подачи импульсов тока на фронте его нарастания создается ультразвуковая вибрация, которая активно влияет на кинетику пластической деформации и модифицирует служебные характеристики материала. При практическом использовании технологии электропластической деформации, особенно при обработке металлов давлением при волочении, прокатке и так далее, имеет смысл проанализировать физические условия создания пондеромоторных эффектов применительно к конкретным технически важным материалам. При деформации метал-

ла в условиях электропластичности, для реализации оптимальных значений достижения максимума пондеромоторных факторов, необходимо выбирать частоту импульса тока, при которой магнитное поле не успевает существенно проникать в образец, при этом скорость диффузии будет зависеть от проводимости металла и частоты тока.

Список использованных источников

1. Троицкий, О. А. Фундаментальные и прикладные исследования электропластической деформации металлов / О. А. Троицкий, В. С. Савенко. – Минск: ИВЦ Минфина, 2013. – 375 с.
2. Remy, L. The kinetics of deformation twinning in face-centered cubic crystals and his relation with sires-strain diagram / L. Remy // *Acta met.* – 1978. – Vol. 26, N 3. – P. 433–451.
3. Рошупкин, А. М. О влиянии электрического тока и магнитного поля на взаимодействие дислокаций с точечными дефектами в металлах / А. М. Рошупкин, И. Л. Батаронов // *Физика твердого тела.* – 1988. – Т. 30, № 11. – С. 3311.
4. Савенко, В. С. Механическое двойникование и электропластичность металлов в условиях внешних энергетических воздействий / В. С. Савенко. – 2-е изд., доп. и перераб. – Минск: БГАФК, 2003. – 203 с.
5. Арцимович, Л. А. Элементарная физика плазмы / Л. А. Арцимович. – Изд. 3-е. – М.: Госатомиздат, 1969. – 98 с.
6. Стил, М. Взаимодействие волн в плазме твердого тела / М. Стил, Б. Вюраль ; пер. с англ. И. С. Веселовского. – М.: Атомиздат, 1973. – 248 с.
7. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы / Ю. В. Баранов [и др.]. – М.: МГИУ, 2001. – 844 с.
8. Savenko, V. S. Electroplastic effect under the simultaneous superposition and magnetic fields / V. S. Savenko // *J. Appl. Phys.* – 1999. – Vol. 86, N 5. – P. 2479–2482.

References

1. Troitskii O.A., Savenko V.S. *Basic and applied researches of electroplastic deformation of metals.* Minsk, Information Computing Center of the Ministry of Finance, 2013. 375 p. (In Russian).
2. Remy L. The kinetics of deformation twinning in face-centered cubic crystals and his relation with sires-strain diagram. *Acta Metallurgica*, 1978, vol. 26, no. 3, pp. 433–451. Doi: 10.1016/0001-6160(78)90170-0
3. Roshchupkin A.M., Bataronov I.L. On the influence of electric current and magnetic field on the interaction of dislocations with point defects in metals. *Fizika tverdogo tela* [Physics of the Solid State], 1988, vol. 30, no. 11, pp. 3311. (In Russian).
4. Savenko V.S. *A mechanical twinning and electroplasticity of metals in the conditions of external power influences.* Minsk, Belarusian State Academy of Physical Education, 2003. 203 p. (In Russian).
5. Artsimovich L.A. *Elementary physics of plasma.* Moskow, Gosatomizdat Publ., 1969. 98 p. (In Russian).
6. Steel M., Vural B. *Wave Interactions in Solid State Plasmas.* New York, McGraw Hill, 1969.
7. Baranov Yu.V., Troitskii O.A., Avraamov Yu.S., Shlyapin A.D. *Physical bases of electropulse and electroplastic processings and new materials.* Moskow, Moscow State Industrial University, 2001. 844 p. (In Russian).
8. Savenko V.S. Electroplastic effect under the simultaneous superposition and magnetic fields. *Journal of Applied Physics*, 1999, vol. 86, no. 5, pp. 2479–2482. Doi: 10.1063/1.371080

Информация об авторах

Савенко Владимир Семенович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой общей физики, Мозырский государственный педагогический университет имени И. П. Шамякина (ул. Студенческая, 28, 247760, Мозырь, Республика Беларусь). E-mail: savenko-vl@rambler.ru

Троицкий Олег Александрович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт машиноведения имени А. А. Благонравова РАН (Малый Харитоньевский пер., 4, 101990, Москва, Российская Федерация). E-mail: oatroitsky@rambler.ru

Силивонец Анастасия Геннадьевна – магистрант кафедры общей физики, Мозырский государственный педагогический университет имени И. П. Шамякина (ул. Студенческая, 28, 247760, Мозырь, Республика Беларусь). E-mail: silivonecanastasiya@mail.ru

Information about the authors

Savenko Vladimir Semenovich – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department of General Physics, I.P. Shamyakin Mozyr State Pedagogical University (28, Student Str., 247760, Mozyr, Republic of Belarus). E-mail: savenko-vl@rambler.ru

Troitsky Oleg Aleksandrovich – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of Regnum Scientific Employee, A.A. Blagonravov Engineering Institute of the Russian Academy of Sciences (4, Malyi Kharitonievsky lane, 101990, Moscow, Russian Federation). E-mail: oatroitsky@rambler.ru

Silivone Anastasiya Gennad'evna – Master Student, Department of Physical Total Heal, I.P. Shamyakin Mozyr State Pedagogical University (28, Student Str., 247760, Mozyr, Republic of Belarus). E-mail: silivonecanastasiya@mail.ru

Для цитирования

Савенко, В. С. Вклад пондеромоторных факторов в реализацию электропластической деформации / В. С. Савенко, О. А. Троицкий, А. Г. Силивонец // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 1. – С. 85–91.

For citation

Savenko V.S., Troickij O.A., Silivonec A.G. The contribution of ponderomotive factors in implementation of electroplasticity deformation. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnych navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2017, no. 1, pp. 85–91. (In Russian).