

УДК 621.318.4

**Ю.В. Батыгин, д-р техн. наук,**

**Е.А. Чаплыгин, канд. техн. наук**

*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,*

*ул. Петровского, 25, г. Харьков, Украина, 61002*

*batygin48@mail.ru,*

*chaplugin\_e\_@mail.ru*

**А. П. Фалалеев, профессор, д-р техн. наук,**

**С.В. Огрызков, ст. преподаватель,**

**А.В. Шимченко**

*Севастопольский национальный технический университет*

*ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Россия, 299053*

*auto@sevntu.sebastopol.ua*

## **АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ НАПРАВЛЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА В ИНДУКТОРНЫХ СИСТЕМАХ С ПРИТЯГИВАЮЩИМ ЭКРАНОМ**

*В низкочастотном приближении проведен теоретический анализ электродинамических процессов в «индукторной системе с притягивающим экраном» (ИСПЭ) при внешнем возбуждении поля круговым одновитковым соленоидом. Достоверность вычислений подтверждена результатами измерений. Обоснована дееспособность ИСПЭ, как эффективного инструмента магнитно-импульсного притяжения заданных участков тонкостенных листовых металлов.*

**Ключевые слова:** *магнитно-импульсное притяжение, магнитно-импульсная обработка, электродинамические усилия, индукторная система.*

**Введение.** Разработки технических систем для реставрации вмятин на поверхности листовых металлов, в основном, инициированы спросом на производственные операции по восстановлению корпусов самолётов и кузовных покрытий наземных транспортных средств, в частности автомобилей [1, 2].

Как показывает практика, более 50% повреждений представляют собой вмятины в зонах с затрудненным или полностью закрытым обратным доступом. Это различные корпусные элементы, крылья, фюзеляжи самолётов. Это двери, капоты, крыши, пороги, бампера автомобилей т.д. Отсюда особый интерес представляют устройства, позволяющие производить реставрацию повреждений (вмятин) на поверхности с внешней стороны без разборки корпуса или кузова и, по возможности, без нарушения существующего защитного покрытия. В этой связи наблюдается рост повышенного интереса к магнитно-импульсным технологиям [3].

Принципиально, оборудование магнитно-импульсных технологий, так же, как в любом обрабатывающем производстве, состоит из двух основных составляющих – источника мощности и инструмента. И если источники мощности, называемые в специальной литературе магнитно-импульсными установками, представляют собой, в смысле назначения, универсальные устройства, то инструменты – источники магнитного поля, получившие название индукторных систем, должны строго соответствовать выполняемой производственной операции [4].

**Обзор литературных источников.** «Индукторные системы с притягивающим экраном» (ИСПЭ), как перспективные инструменты магнитно-импульсного притяжения заданных участков тонкостенных проводящих листов (в первую очередь – немагнитных), достаточно подробно описаны в работе [5]. Их действенность определяется законом Ампера и основана на силовом взаимодействии проводников с одинаково направленными индуцированными токами. Конструктивно, таковыми являются листовая заготовка и дополнительный элемент – вспомогательный притягивающий экран. Между ними располагается плоский одновитковый соленоид, поле которого возбуждает индуцированные токи. Приоритет предложения намного раньше был защищён патентом [6].

Следует отметить, что в первоначальном варианте действенность ИСПЭ рассматривалась без учёта возможных магнитных свойств обрабатываемых объектов. Но, как оказалось в дальнейшем, и в ИСПЭ – индукторных системах с ферромагнитными заготовками, последние, помимо сил притяжения по закону Ампера, будут испытывать также и притяжение, обусловленное их магнитными свойствами [7, 8]. Отмеченное обстоятельство позволяет говорить об универсальности и перспективности ИСПЭ, как инструментов для деформирования магнитных и немагнитных тонкостенных листовых металлов [9].

Дальнейшее совершенствование «индукторных систем с притягивающим экраном» привело к решению, обеспечивающему высокую эффективность при наличии только одного внешнего источника магнитного поля в виде плоского кругового соленоида, расположенного поверх вспомогательного экрана. Проникая сквозь листовые экран и заготовку, поле соленоида возбуждает в них одинаково

направленные индуцированные токи. Силовое взаимодействие последних при жёстко фиксированном экране приводит к притяжению заготовки. Приоритет предложения был защищён патентом Украины [10].

**Цель работы** – теоретический анализ электродинамических процессов в ИСПЭ – индукторной системе с внешним возбуждением для обоснования принципиальной работоспособности системы, как эффективного инструмента магнитно-импульсного притяжения заданных участков тонкостенных листовых металлов.

**Принцип действия ИСПЭ.** Принцип действия ИСПЭ, возбуждаемой внешним источником магнитного поля, поясним с привлечением наиболее иллюстративной физической идеализации, имеющей место при интенсивном проникновении действующих полей.

Из априорных феноменологических соображений следует, что в случае достаточно «прозрачных» экрана и заготовки в металле каждого из них индуцируются токи с временными зависимостями, пропорциональными производной  $\approx \frac{dJ(t)}{dt}$ , где  $J(t)$  – ток индуктора [5]. В свою очередь из закона

Ампера следует, что сила притяжения будет прямо пропорциональна квадрату производной  $\approx \left(\frac{dJ(t)}{dt}\right)^2$  [5, 10]. Силы отталкивания, обусловленные взаимодействием индуцированных токов с

возбуждаемыми магнитными полями, пропорциональны произведению  $\approx J(t) \cdot \frac{dJ(t)}{dt}$  [4, 9]. Интеграл по времени действия сил от этого произведения представляет собой их интегральный импульс. Очевидно, что для  $t \in [0; \infty]$  величина этого импульса, определяющего результирующую действенность сил отталкивания, стремится к нулю [5, 9]. Таким образом, в предложенной «индукторной системе с притягивающим экраном» должны возбуждаться только силы притяжения, силы отталкивания будут отсутствовать.

**Расчётные соотношения.** В обосновании дееспособности предложенного инструмента магнитно-импульсного притяжения ограничимся рассмотрением цилиндрической конструкции индукторной системы с одинаковыми тонкостенными листовыми немагнитными металлами (напомним, что реально, один из них – вспомогательный экран, второй – объект обработки) и круговым плоским одновитковым соленоидом, расположенным над поверхностью вспомогательного экрана. Межвитковые расстояния – пренебрежимо малы.

Следует отметить, что принимаемое ограничение по свойствам объектов обработки (немагнитные металлы) позволяет оценить минимум силовых показателей исследуемого метода, поскольку не учитывает появления дополнительных магнитных сил, которые только увеличат эффективность притяжения.

При решении поставленной задачи будем строго следовать авторским алгоритмам в работах [4, 5, 8, 9]. В этой связи изложение математических преобразований сократим и оставим лишь узловые моменты постановки и результатов выполненного решения.

В цилиндрических координатах схематическое изображение исследуемой ИСПЭ – индукторной системы представлено на рисунке 1.

Примем следующие допущения:

– толщина соленоида пренебрежимо мала, так что его металл не оказывает никакого влияния на протекающие электромагнитные процессы;

– имеет место аксиальная симметрия ( $\frac{\partial}{\partial \phi} = 0$ ,  $\phi$  – азимутальный угол);

– экран и заготовка есть одинаковые листовые металлы с довольно большими поперечными размерами, достаточно малой толщиной –  $d$ , электропроводностью –  $\gamma$ , абсолютной магнитной проницаемостью –  $\mu_0$  ( $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума), они расположены на одинаковом расстоянии от основного витка индуктора –  $h$ , расстояние от дополнительного витка до вспомогательного экрана также равно  $h$ ;

– амплитудно-временные параметры тока в витках индуктора таковы, что справедливо известно квазистационарное приближение по Ландау [4, 5]:  $\frac{\omega}{c} \cdot \ell \ll 1$ , где  $\omega$  – циклическая частота,  $c$  – скорость света в вакууме,  $\ell$  – характерный размер системы;

– исследуемая «индукторная система с притягивающим экраном» работает в низкочастотном режиме, когда  $\omega \cdot \tau \ll 1$ , где  $\tau = \mu_0 \gamma d^2$  – характерное время проникновения действующих полей в листовые металлы [5].

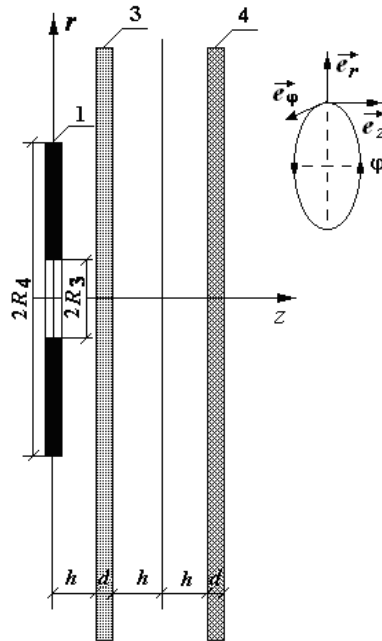


Рисунок 1 – Расчётная модель в цилиндрической системе координат:

$\vec{e}_r, \vec{e}_\varphi, \vec{e}_z$  – направляющие орты, 1 – многovitковый индуктор ( $R_3, R_4$  – внутренний и внешний радиусы);  
 3 – экран ( $d$  – толщина); 4 – заготовка ( $d$  – толщина);  $h$  – расстояние от индуктора до экрана,  
 $(2h)$  – расстояние между экраном и листовой заготовкой.

Уравнения Максвелла для возбуждаемых составляющих вектора электромагнитного поля ( $E_\varphi \neq 0, H_{r,z} \neq 0$ ), преобразованных по Лапласу с учётом нулевых начальных условий, имеют вид:

$$\frac{\partial H_r(p, r, z)}{\partial z} - \frac{\partial H_z(p, r, z)}{\partial r} = j_\varphi(p, r, z); \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi(p, r, z)) = -\mu_0 \cdot p \cdot H_z(p, r, z); \quad (2)$$

$$\frac{\partial E_\varphi(p, r, z)}{\partial z} = \mu_0 \cdot p \cdot H_r(p, r, z); \quad (3)$$

где  $p$  – параметр интегрального преобразования Лапласа;

$$E_\varphi(p, r, z) = L\{E_\varphi(t, r, z)\}; \quad H_{r,z}(p, r, z) = L\{H_{r,z}(t, r, z)\};$$

$$j_\varphi(p, r, z) = L\{j_\varphi(t, r, z)\}.$$

В общем случае плотность тока в правой части уравнения (1) записывается в виде:

$$j_\varphi(p, r, z) = (p \cdot \epsilon_0 + \gamma) \cdot E_\varphi(p, r, z) + j_\varphi^{(i)}(p, r, z), \quad (4)$$

где  $j_\varphi^{(i)}(p, r, z)$  – плотность сторонних токов в соленоиде,

$$j_\varphi^{(i)}(p, r, z) = j(p) \cdot f(r) \cdot \delta(z),$$

$f(r)$  и  $j(p)$  – функция радиального распределения и L-изображения

плотности тока в возбуждающем соленоиде, соответственно,

$\delta(z)$  – дельта-функция Дирака,

$\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Интегрируя систему дифференциальных уравнений Максвелла (1) – (3) с учётом зависимости для тока (4) (детали можно проследить в цитированных авторских литературных источниках [4, 5, 8, 9]),

находим индуцированные токи. В низкочастотном режиме действующих полей их можно представить следующими зависимостями.

В металле вспомогательного экрана возбуждается сигнал:

$$J_{\phi}^{(2)}(\psi, r) = -J_m \cdot \int_0^{\infty} f(x) \cdot \frac{e^{-x \frac{h}{d}} (1 - e^{-x})}{x} J_1 \left( x \cdot \frac{r}{d} \right) dx, \quad (5)$$

где  $J_m = \left( \frac{I_m}{R_4 - R_3} \right) \cdot \frac{\omega \tau}{2} \cdot \frac{dg(\psi)}{d\psi}$  – «условная» амплитуда индуцированного сигнала;

$I_m$  и  $g(\psi) = e^{-\delta_0 \psi} \cdot \sin(\psi)$  – амплитуда и фазовая зависимость возбуждающего тока в соленоиде;

$\psi = \omega \cdot t$  – фаза,  $t$  – время,  $f(x) = \frac{1}{x^2} \cdot \int_{x \frac{R_3}{d}}^{x \frac{R_4}{d}} y \cdot J_1(y) dy$ .

В металле листовой заготовки индуцируется ток:

$$J_{\phi}^{(3)}(\psi, r) = -J_m \cdot \int_0^{\infty} f(x) \cdot e^{-x \left( \frac{3h}{d} + 1 \right)} \cdot \frac{(1 - e^{-x})}{x} J_1 \left( x \frac{r}{d} \right) dx. \quad (6)$$

В рассматриваемом низкочастотном режиме, как было ранее указано, интегральная действительность сил отталкивания стремится к нулю [5, 9]. При жёстко фиксированном вспомогательном экране на заготовку будет действовать только сила притяжения. Зависимость для силы притяжения (силы Ампера) запишем в терминах фазы возбуждающего тока индуктора [9].

$$F_{attr}(\psi, r) = \mu_0 \cdot J_{\phi}^{(2)}(\psi, r) \cdot J_{\phi}^{(3)}(\psi, r) \cdot \frac{r}{(2h)}. \quad (7)$$

Численные оценки проведём для исходных данных, характерных в магнитно-импульсной обработке металлов [4, 5]:  $I_m = 120$  кА,  $\omega = 2\pi \cdot 1500$  Гц,  $R_3 = 0,005$  м,  $R_4 = 0,05$  м,  $d = 0,001$  м,  $h = 0,005$  м.

Результаты вычислений представлены на рисунке 2.

Из расчётных зависимостей на рисунке 2 следует, что в исследуемой ИСПЭ – индукторной системе амплитуды удельной силы притяжения достигают  $\approx 2$  МПа. Усреднение по площади силового воздействия даёт величину  $\approx 1$  МПа. Необходимо отметить, что незначительное и вполне реальное для практики увеличение тока индуктора, например, до  $\approx 150$  кА, даёт рост сил притяжения более чем в  $\approx 2$  раза. Как следует из практики магнитно-импульсной обработки металлов, данных величин силового воздействия вполне достаточно для эффективного деформирования тонкостенных листовых проводников.

Вычисления характеристик индукционных и силовых показателей предложенной конструкции ИСПЭ с внешним источником магнитного поля дополним модельными экспериментами.

В качестве источника мощности был взят низковольтный генератор токовых импульсов. Источником магнитного поля служил одновитковый индуктор с внутренним и внешним радиусами, соответственно,  $R_1 = 0,07$  м и  $R_2 = 0,075$  м, подключённый к генератору через согласующее устройство, обеспечивающее рабочую частоту  $f \approx 2$  кГц [5].

Листовые металлы – образцы из немагнитной стали с удельной электропроводностью  $\gamma = 0,4 \cdot 10^7$  1/Ом·м и толщиной  $d \approx 0,001$  м. Расстояние от витка до экрана составляло  $h = 0,00015$  м, расстояние между листовыми металлами, соответственно,  $2h = 0,0003$  м.

Радиальное распределение индуцированных токов измерялось по методике, подробно описанной авторами научных изданий [4, 5]. Согласно цитируемым работам, с двух сторон вдоль диаметра витка в листовые металлы попарно впаивались электроды, сигналы с каждой пары которых подавались на вход осциллографа. Поскольку прямолинейные участки листовых металлов между электродами можно рассматривать как активные сопротивления, измеряемые сигналы будут пропорциональны индуцированному току.

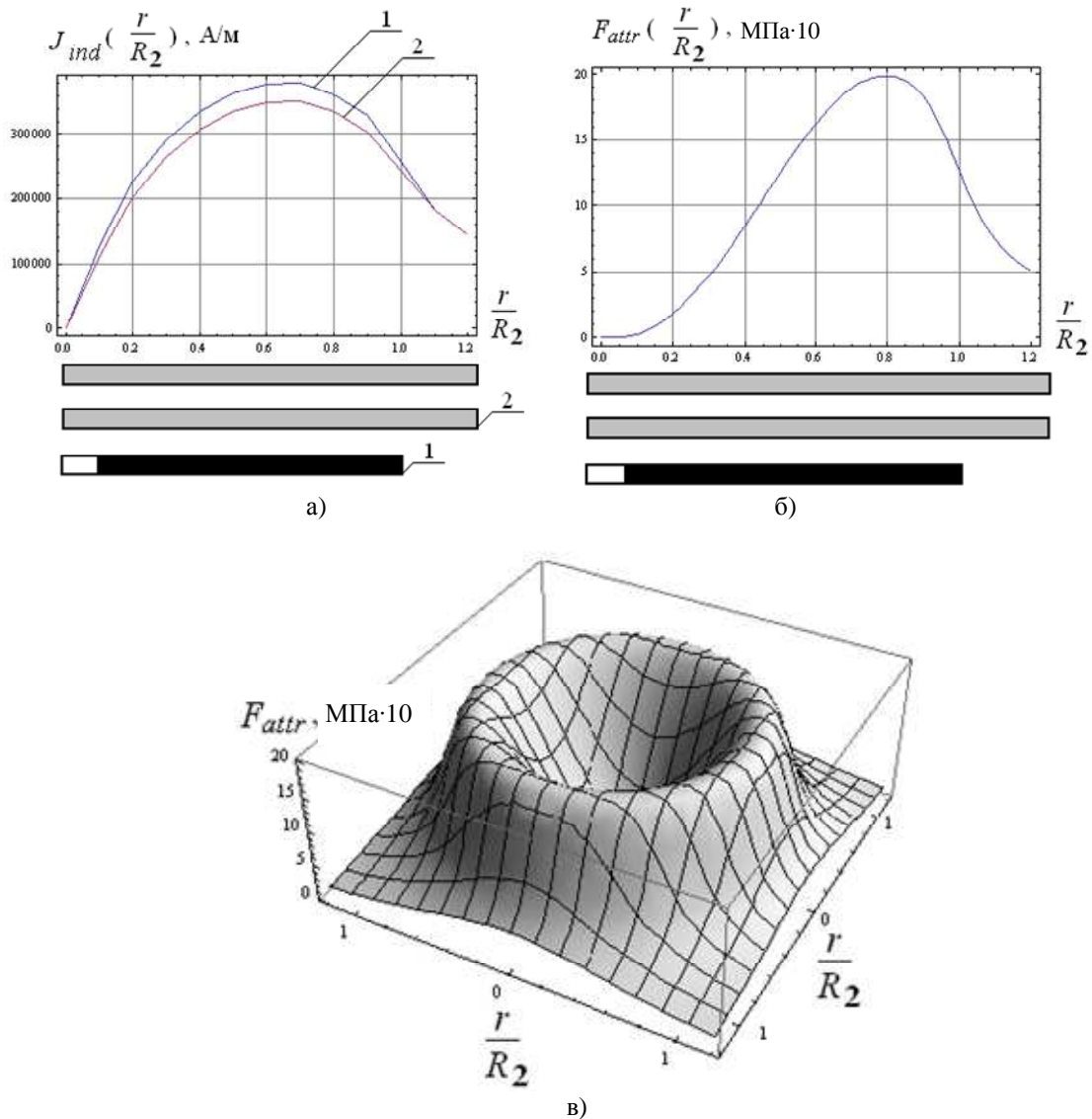


Рисунок 2 – Пространственные распределения возбуждаемых токов и сил притяжения:

- а) токи, индуцированные в металле вспомогательного экрана – 1 и листовой заготовки – 2;  
 б) радиальное распределение силы притяжения; в) объёмная эпюра пространственного распределения силы притяжения

Типичные осциллограммы, иллюстрирующие временные зависимости индуцированных токов –  $j_{ind}(t)$ , даны на рисунке 3. Их вид для экспоненциально затухающей формы возбуждающего тока –  $j_{coil}(t)$  означает существование дифференциальной связи типа  $j_{ind}(t) \sim \frac{dj_{coil}(t)}{dt}$ , что весьма характерно для электромагнитных процессов при интенсивном проникновении действующих полей при низких рабочих частотах [5, 7 – 9].

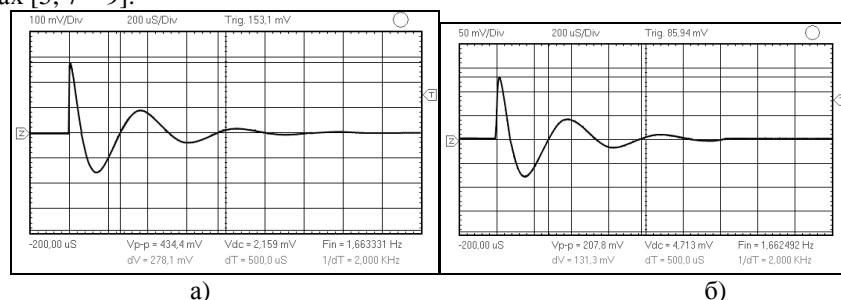


Рисунок 3 – Типичные осциллограммы токов, индуцированных в листовых металлах:  
 а) вспомогательный экран, б) заготовка

Результаты измерений с расчётными данными в относительных единицах (нормировка на максимум) приведены на рисунке 4.

Достаточное соответствие картин радиального распределения индуцированных токов на рисунках 4, а и 4, б позволяет сделать вывод о достоверности вычислений характеристик процессов в «индукторной системе с притягивающим экраном», возбуждаемой низкочастотным магнитным полем внешнего соленоида.

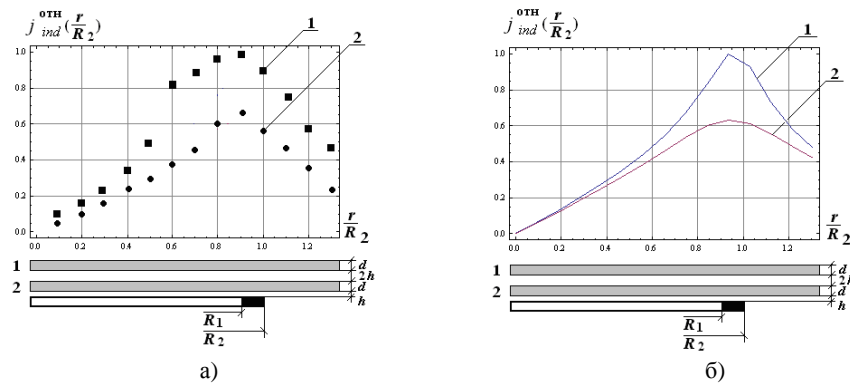


Рисунок 4 – Пространственные распределения токов, индуцированных в металле вспомогательного экрана (1) и листовой заготовки (2): а) эксперимент, б) расчёт

В конечном итоге, основным результатом проведенного анализа электродинамических процессов является вывод о практической действенности предложенного варианта конструкции инструмента для притяжения заданных участков тонкостенных листовых металлов.

В заключение несколько замечаний.

И хотя, в целом, результаты проведенных вычислений и экспериментов свидетельствуют о дееспособности «индукторных систем с притягивающим экраном» при внешнем возбуждении магнитного поля, для конструирования инструментов данного типа необходимы дальнейшие оценки в реальном временном режиме действующих полей. Речь идёт о частотном диапазоне, в котором представленная идеализация «абсолютно прозрачных» экрана и заготовки максимально соответствует реальным электромагнитным процессам. Априори, исходя их физических соображений, можно предположить, что с увеличением рабочих частот будут изменяться временные зависимости индуцированных токов. Это обстоятельство повлечёт за собой снижение действенности сил притяжения и рост сил отталкивания.

Так, в случае «прозрачного» экрана и идеально проводящей заготовки последняя должна испытывать преобладающее действие сил отталкивания. В случае идеально проводящего экрана заготовка вообще не должна испытывать никакого силового воздействия. Данные рассуждения подчёркивают значимость правильного выбора рабочих частот для обеспечения не только реальной, но и эффективной действенности ИСПЭ с внешним источником возбуждающего магнитного поля.

**Выводы.** В низкочастотном приближении проведен теоретический анализ электродинамических процессов в «индукторной системе с притягивающим экраном» при внешнем возбуждении магнитного поля круговым одновитковым соленоидом.

Достоверность результатов вычислений подтверждена измерениями характеристик индукционных явлений в исследуемой ИСПЭ – индукторной системе.

Теоретически обоснована принципиальная работоспособность «индукторной системы с притягивающим экраном», как эффективного инструмента магнитно-импульсного притяжения заданных участков тонкостенных листовых металлов.

#### **Библиографический список использованной литературы**

1. Proceedings of the 1-st International Conference on High Speed Metal Forming, Dortmund, Germany, 31 march – 1 april, 2004. – Dortmund, Germany, 2004. – 300 p.
2. Батыгин Ю. В. Магнитно-импульсные методы и системы для притяжения тонкостенных листовых металлов / Ю.В. Батыгин, В.И. Лавинский, А.В. Бажинов // Труды международной научно-технической конференции «Магнитно-импульсная обработка металлов. Пути совершенствования и развития» – 2007, Самара, 18 – 19 сент. 2007 г. – Самара, 2007. – С. 3–13.
3. Возможности магнитно-импульсной технологии для рихтовки кузовных элементов автомобилей / Ю. В. Батыгин, В. И. Лавинский, Г. С. Сериков, Е. А. Чаплыгин // Труды 13-ой международной научно-

технической конференции «Физические и компьютерные технологии» –2007, Харьков, 19–20 апр. 2007 г, – Харьков, 2007. – С.352 – 355.

4. Батыгин Ю. В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. В 3 т. Т. 1. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий / Ю. В. Батыгин, В. И. Лавинский, Л. Т. Хименко; под ред. Батыгина Ю. В. – Харьков: Изд-во МОСТ – Торнадо, 2003. – 284 с.

5. Туренко А. Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. В 3 т. Т. 3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями / А. Н. Туренко, Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов; под ред. Батыгина Ю. В. – Харьков : изд-во ХНАДУ, 2009. – 249 с.

6. Пат. 74909 Украина, МПК<sup>7</sup> B21D 26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок / Батигін Ю. В., Лаврінський В. И., Харін В. Л.; заявитель и патентообладатель Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет. – № U 2004010542; заяв. 26.01.04; опубл. 15.02.06, Бюл. №2.

7. Батыгин Ю. В. Магнитно-импульсное притяжение/отталкивание тонкостенных листовых ферромагнетиков / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов // Электричество. – 2012. – № 8. – С. 58–65.

8. Batygin Y. Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – Fundamentals and perspective applications / Y. Batygin, S. Golovashchenko, A. Gnatov // Journal of Materials Processing Technology. – 2013. – № 213 (3). – P. 444 – 452.

9. Batygin Y. Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals / Y. Batygin, S. Golovashchenko, A. Gnatov // Journal of Materials Processing Technology. – 2014. – № 214 (2). – P 390–401.

10. Пат. 77579 Украина, МПК<sup>7</sup> B21D 26/14. Спосіб магнітно-імпульсного притягання металевих об'єктів заготовок одновитковим круговим індуктором, розташованим над допоміжним екраном / Батигін Ю.В. [и др.]; заявитель и патентообладатель Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет. – № U 2012 07542 ; заяв. 20.06.12; опубл. 25.02.13, Бюл. №4.

*Поступила в редакцию 25.12.2013 г.*

#### **Батигін Ю.В., Чаплигін Е.О., Фалалєєв А.П., Огризков С.В., Шимченко А.В. Аналіз можливості направленої деформації листового металу у індукторних системах з притягуючим екраном**

У низькочастотному наближенні проведений теоретичний аналіз електродинамічних процесів в «індукторній системі з екраном, що притягує» (ІСЕП) при зовнішньому збудженні поля круговим одневітковим соленоїдом. Достовірність підрахунків підтверджена результатами вимірювань. Обґрунтована дієздатність ІСЕП, як ефективного інструменту магнітно-імпульсного тяжіння заданих ділянок тонкостінних листових металів.

**Ключові слова:** магнітно-імпульсне притягання, магнітно-імпульсна обробка, електродинамічні зусилля, індукторна система.

#### **Batygin Y.V., Chaplugin E.A., Falaleev A.P., Ogrizkov S.V., Shimchenko A.V. Opportunity analysis of sheet metal directional deformation in inductor systems with attractive screen**

The theoretical analysis of electro-dynamic processes in the «inductor system with an attractive screen» (ISAS) at external excitation of the field by a circular one-coil solenoid is conducted in the low-frequency approaching. Authenticity of calculations is confirmed by the results of measurements. The ISAS capability is grounded, as effective tool of magnetically-impulsive attraction of the set areas of the thin-walled sheet metals.

**Keywords:** electromagnetic attraction, electromagnetic treatment, electrodynamic force, inductor system.