

УДК 621.318

А.Ю. Бондаренко, В.Б. Финкельштейн, Е.Ф. Яремина
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет
**ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ РИХТОВКИ ВМЯТИН В
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЯХ АВТОМОБИЛЬНЫХ КУЗОВОВ**

В данной статье показано использование конкретной конструкции для устранения вмятин в кузовах автомобилей. Предлагаемый инструмент включает прямоугольный плоский индуктор с продольными прорезями, экран и листовую заготовку, в которой имеется вмятина, подлежащая устранению. Проведен анализ электромагнитных процессов в инструменте силового магнитно-импульсного воздействия. Показано, что для более эффективного подавления магнитного давления необходимо не только увеличение количества вырезов, но и одновременное увеличение общей ширины токопроводов.

Ключевые слова: индукторная система, магнитно-импульсная рихтовка, плоский индуктор с продольными прорезями.

Рис. 4. Форм. 4. Лит. 8.

О.Ю. Бондаренко, В.Б. Финкельштейн, О.Ф. Єрьоміна
**ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОГО РИХТУВАННЯ ВМ'ЯТИН У
МЕТАЛЕВИХ ПОКРИТТЯХ АВТОМОБІЛЬНИХ КУЗОВІВ**

У даній статті показано використання конкретної конструкції для усунення вм'ятин в кузовах автомобілів. Пропонований інструмент включає прямокутний плоский індуктор з поздовжніми прорізами, екран і листову заготовку, в якій є вм'ятини, що підлягає усуненню. Проведено аналіз електромагнітних процесів в інструменті силового магнітно-імпульсного впливу. Показано, що для більш ефективного подавлення магнітного тиску необхідно не тільки збільшення кількості вирізів, а й одночасне збільшення загальної ширини струмопроводів

Ключові слова: індукторна система, магнітно-імпульсне рихтування, плоский індуктор з поздовжніми прорізами.

A.Yu. Bondarenko, V.B. Finkelstein, E.F. Yeryomina
**TOOL FOR MAGNETIC PULSE STRAIGHTENING NICKS IN METAL COATINGS OF CAR
BODIES**

This article shows use a particular design to remove dents in the bodywork of car. This tool comprises a rectangular flat inductor with slits and the sheet metal in which there is a dent to be eliminated. The analysis of electromagnetic processes in the tool magnetic pulse effects. It is shown that the presence of an appropriate amount of cutouts allow initiate attractive forces with amplitudes sufficient to counter the "scattered" forces of the magnetic pressure, repulsive workpiece from the inductor. The concrete calculation tasks and the distributions of the tangential component of the magnetic field on the surface of the screen and a workpiece for current lead with one and two notches of varying size in the central part, and also for continuous electrical pathway.

Keywords: induction system, magnetoimpuls straightening, flat inductor with slits.

Введение. В настоящее время нередко мы сталкиваемся с проблемой появления вмятин различной формы и размеров на металлических кузовах транспортных средств. Как часто бывает, традиционная рихтовка с внутренней стороны кузовной обшивки невозможна из-за отсутствия доступа [1]. Прогрессивные магнитно-импульсные методы притяжения заданных участков листовых металлов, позволяющих осуществлять операции рихтовки с внешней стороны автомобильного кузова без какого-либо механического контакта с возможным сохранением защитного лакокрасочного покрытия [2,3,4], являются достаточно актуальными в области автомобильной и авиа- промышленности.

Настоящая работа посвящена анализу электромагнитных процессов в одном из вариантов конструктивного исполнения инструмента силового магнитно-импульсного воздействия (индукторной системы), предназначенного для рихтовки вмятин в металлических покрытиях автомобильных кузовов, обшивках летательных аппаратов, и др. [5].

Цель работы. Провести анализ электромагнитных процессов в инструменте силового магнитно-импульсного воздействия, предназначенного для рихтовки вмятин в металлических покрытиях транспортных средств.

Работа инструмента. Конструктивно, предлагаемый инструмент включает прямоугольный плоский индуктор с продольными прорезями (схематически показан на рис. 1а), экран и листовую заготовку, в которой имеется вмятина, подлежащая устранению.

Все три составляющие укладываются параллельными слоями: экран – индуктор – листовая заготовка, которая размещается так, чтобы вмятина находилась в рабочей зоне системы.

Особенность действенности таких систем заключается в том, что воздействие на обрабатываемый металл и его движение происходит по направлению к индукторам – источникам магнитных полей. Математически это означает: вектор действующей силы совпадает с вектором внешней нормали к поверхности листового металла.

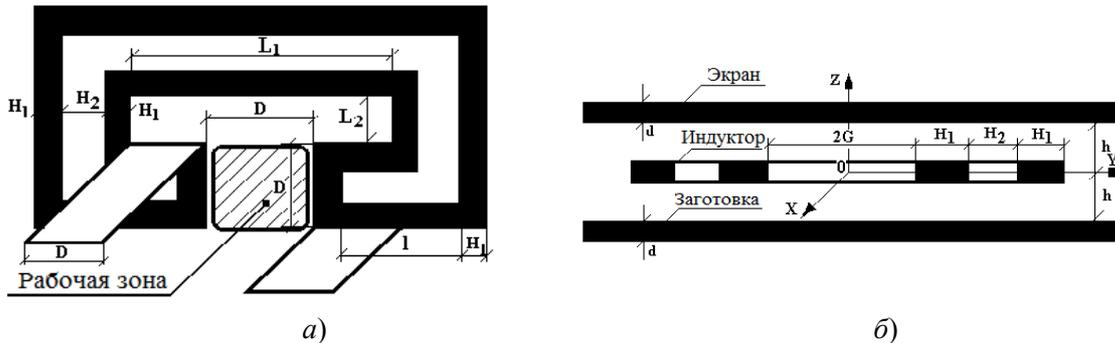


Рис. 1. Инструмент магнитно-импульсной рихтовки, принцип действия которого предполагает притяжение заданного участка листового металла: а) схематическое изображение; б) расчётная модель

Принцип действия предлагаемой индукторной системы состоит в следующем.

Протекание тока собственно в индукторе возбуждает вихревые токи в листовых металлах (один из них экран, другой – заготовка с вмятиной). Индуцированные токи в экране и заготовке текут в одном направлении. Они должны притягиваться друг к другу. Соответственно, если вмятину расположить в рабочей зоне, показанной на рис. 1а, силовое взаимодействие указанных токов позволит притянуть её к поверхности индуктора, то есть решить поставленную задачу по устранению вмятины.

Продольные прорезы в токопроводе индуктора должны обеспечить нейтрализацию сил магнитно-импульсного отталкивания его от заготовки с вмятиной. Как указывалось выше, токи, индуцированные в экране и листовой заготовке, текут в одном направлении. В зоне прорезей эти токи должны притягиваться друг к другу, противодействуя отталкиванию, причиной которого является возбуждение сил магнитного давления на листовый металл заготовки с вмятиной со стороны поля индуктора.

Результаты исследований. Для анализа электромагнитных процессов примем расчётную модель в декартовой прямоугольной системе координат (см. рис. 1б), соответствующую поперечным сечениям системы в ортогональных направлениях. Размер $2G$ на рис. 1б может соответствовать размерам L_1 или L_2 на рис. 1а.

Для решения задачи примем следующие допущения.

- Имеет место геометрическая симметрия системы относительно координатных плоскостей XOY и ZOX .
- Экран и заготовка – одинаковые листовые металлы достаточно больших поперечных размеров.
- По токопроводу с внутренним разрезом шириной H_2 течёт ток $I(t)$, его направления в ветвях слева и справа относительно плоскости ZOX (соответственно рис. 1б) – противоположны.
- Вдоль оси абсцисс система обладает достаточно большой протяжённостью, так что

$$\frac{\partial}{\partial x} = 0.$$

- Толщина токопроводов пренебрежимо мала.
- Расстояния от индуктора до поверхностей экрана и заготовки – h , а также толщины экрана и заготовки – d много меньше всех характерных размеров системы, то есть

$$\frac{h}{b} \ll 1, \quad \frac{d}{b} \ll 1 \quad (\text{наибольший размер в поперечном направлении } b = 2 \cdot (2 \cdot H_1 + H_2) + G).$$

- Задача решается в приближении плоских волн, для которого справедлива прямо пропорциональная связь между касательными составляющими векторов электромагнитного поля на поверхности проводника, отделяющего источник поля от свободного полупространства [6]:

$$H_{\tau} = \pm(\gamma \cdot d) \cdot E_{\tau},$$

где γ , d – электропроводность и толщина проводника.

Решение поставленной задачи можно провести с помощью известных методов интегрирования уравнений Максвелла аналогично тому, как это было сделано для инструментов магнитно-импульсной рихтовки с одновитковыми индукторными системами цилиндрической геометрии в работах [7,8].

Опуская подробности математических преобразований, выполненных с привлечением интегральных преобразований, запишем формулу для изображения напряжённости возбуждаемого магнитного поля в и пространствах на поверхностях проводящих плоскостей, ограничивающих рассматриваемую индукторную систему снизу и сверху.

$$H_y(p, \lambda, \pm h) = - \frac{p \cdot j(p)}{\left(p + \frac{\lambda}{\mu_0 \gamma d} \cdot \text{th}(\lambda h) \right)} \cdot \frac{f(\lambda)}{2 \cdot \text{ch}(\lambda h)}, \quad (1)$$

где $j(p) = \frac{I(p)}{2 \cdot H_1}$, $I(p) \leftrightarrow I(t)$ – ток в индукторе,

λ – параметр интегрального преобразования Фурье,

$f(\lambda)$ – Фурье-образ функции, описывающей поперечное распределение плотности тока в индукторе,

$$f(\lambda) = \frac{1}{\lambda} \cdot \sin\left(\frac{\lambda}{2} \cdot H_1\right) \cdot \sin\left(\frac{\lambda}{2} \cdot (2G + 2H_1 + H_2)\right) \cdot \cos\left(\frac{\lambda}{2} \cdot (H_1 + H_2)\right).$$

Достоверность полученного результата (1) легко проверить предельными переходами к физически прозрачным ситуациям, когда $h \rightarrow 0, \infty$.

В первом случае, вследствие достаточной близости проводников к индуктору на поверхности каждого из них распределение касательной составляющей напряжённости должно полностью повторять распределение плотности сторонних токов в индукторе с половинной амплитудой.

Во второй предельной ситуации, вследствие достаточной удалённости проводников очевидно, что поле на их поверхностях должно стремиться к нулю.

Итак,

$$\lim_{h \rightarrow 0} H_y(p, \lambda, \pm h) = - \lim_{h \rightarrow 0} \frac{p \cdot j(p)}{\left(p + \frac{\lambda}{\mu_0 \gamma d} \cdot \text{th}(\lambda h) \right)} \cdot \frac{f(\lambda)}{2 \cdot \text{ch}(\lambda h)} = - \frac{j(p)}{2} \cdot f(\lambda).$$

Поскольку $f(\lambda)$ есть строгий Фурье-образ функции, описывающей поперечное распределение плотности токов в индукторе, следовательно, и найденный предел будет соответствовать тому же пространственному распределению. Амплитуда поля будет равна половинной амплитуде плотности тока в индукторе, как и следовало ожидать из закона полного тока.

Далее, как и указывалось ранее,

$$\lim_{h \rightarrow \infty} H_y(p, \lambda, \pm h) = - \lim_{h \rightarrow \infty} \frac{p \cdot j(p)}{\left(p + \frac{\lambda}{\mu_0 \gamma d} \cdot \text{th}(\lambda h) \right)} \cdot \frac{f(\lambda)}{2 \cdot \text{ch}(\lambda h)} \approx 0.$$

Таким образом, выполненные предельные переходы подтвердили достоверность найденного результата (1).

Перейдём в пространство оригиналов и запишем выражение для касательной составляющей напряжённости магнитного поля на поверхностях экрана и заготовки, пригодное для проведения практических вычислений.

$$H_y(t, y, \pm h) = \frac{1}{2} \cdot \int_0^{\infty} \left[\left(\frac{dj(t)}{dt} \cdot e^{-\beta(\lambda)t} \right) \cdot \frac{f(\lambda)}{\operatorname{ch}(\lambda h)} \cdot \sin(\lambda y) \right] \cdot d\lambda, \quad (2)$$

$$\text{где } \beta(\lambda) = \frac{\lambda}{\mu_0 \gamma d} \cdot \operatorname{th}(\lambda h).$$

Пример расчета. В токопроводе индуктора протекает ток, плотность которого равна $j(t) \approx j_m \cdot \sin(\omega t)$, частота $\omega = \pi \cdot 10^4$ Гц (5 кГц).

Форма индуктора и индукторной системы соответствуют схематическим изображениям на рис. 1а,б.

Ширина участков токопроводов и внутреннего разреза варьируются $H_2 = k \cdot H_1$, $k \in [0.5, 1]$, общая ширина токопровода зафиксирована: $2H_1 + H_2 \approx 0.02$ м.

Расстояния от токопроводов до экрана и заготовки одинаковы и равны $h = 0.001$ м.

Расстояние от геометрического центра системы до токопроводов $G = 0.005$ м, 0.03 м. Данные цифры соответствуют сечениям во взаимно ортогональных направлениях соответственно рис. 1.

Заготовка и экран выполнены из листовой стали толщиной $d = 0.001$ м ($\gamma = 0.6 \cdot 10^7$ $\frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$).

Для момента времени, соответствующему первому максимуму возбуждающего тока, свёртка функций в (2) принимает вид:

$$\left(\frac{dj(t)}{dt} \cdot e^{-\beta(\lambda)t} \right) = \frac{1 - \beta_1(\lambda) \cdot e^{-\beta_1(\lambda) \frac{\pi}{2}}}{1 + \beta_1^2(\lambda)} = g(\lambda), \quad (3)$$

$$\text{где } \beta_1(\lambda) = \frac{\beta(\lambda)}{\omega}.$$

В окончательном варианте формула для вычисления касательной компоненты напряжённости магнитного поля на поверхностях экрана и заготовки (естественно, что они зеркально симметричны) в рассматриваемой индукторной системе запишется как:

$$H_y(t = \frac{\pi}{2\omega}, y, z = \pm h) = -\frac{4}{\pi} j_m \cdot \int_0^{\infty} \frac{f(\lambda)}{\operatorname{ch}(\lambda h)} \cdot g(\lambda) \cdot \sin(\lambda y) \cdot dy. \quad (4)$$

Результаты расчётов, сформулированных в терминах относительных напряжённостей приведены на рис. 2 – 4.

$$H_0 = \left| \frac{\pi}{4 j_m} H_y(t = \frac{\pi}{2\omega}, y, z = \pm h) \right|,$$

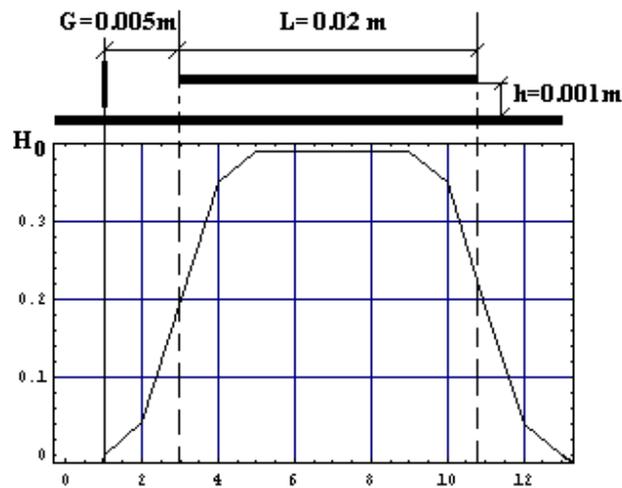


Рис. 2. Распределение касательной компоненты напряжённости магнитного поля по поверхностям экрана и заготовки для сплошного токопровода

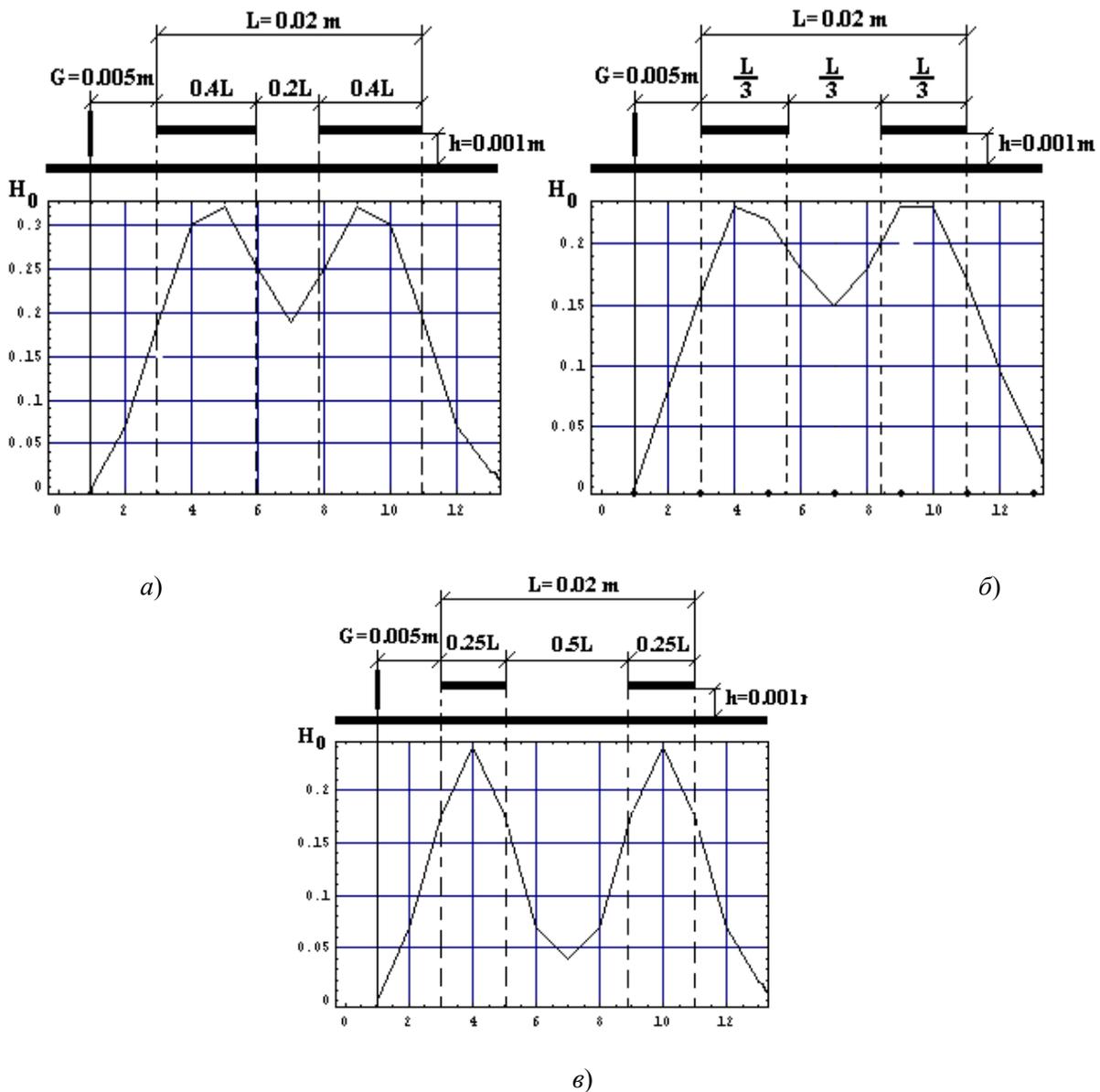


Рис. 3. Распределение касательной компоненты напряжённости магнитного поля по поверхностям экрана и заготовки для токопровода с одним вырезом различной величины в центральной его части

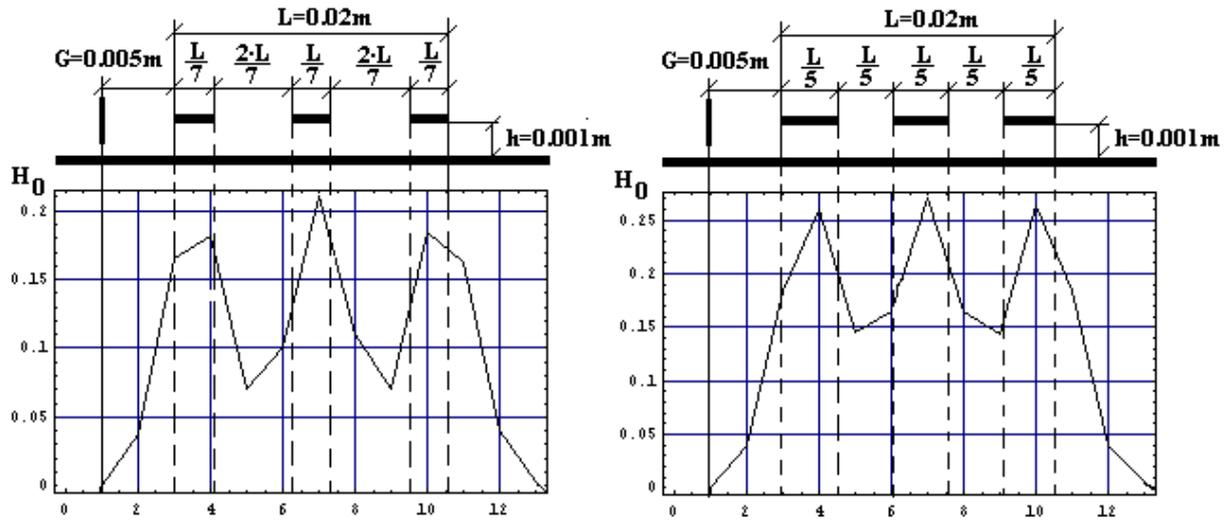


Рис. 4. Распределение касательной компоненты напряжённости магнитного поля по поверхностям экрана и заготовки для токопровода с двумя вырезами различной величины в центральной его части

Анализ расчётных результатов показал следующее:

- Величины токов, возбуждаемых на поверхностях экрана и заготовки за внешними краями индуктора, практически одинаковы для всех рассмотренных конструкций основного токопровода и составляют не более $\sim (0.02 - 0.04) \cdot I_m$, то есть 2-4% от общего тока индуктора.
- Величины токов, возбуждаемых в областях, соответствующих продольным вырезам в токопроводах, несколько выше, чем на внешних краях, до $\sim 0.13 \cdot I_m$ (13% от общего тока индуктора). Их амплитуды зависят от величины разреза.
- Существенное повышение суммарной амплитуды токов, индуцированных в центральных зонах, имеет место при увеличении количества вырезов, причём их размер практически не оказывает влияния на количественные характеристики процесса.
- Если в первой рассмотренной конструкции токопровода без выреза магнитному давлению на заготовку не препятствовали практически никакие силы, то в системах с двумя вырезами такое противодействие будет иметь место за счёт взаимного притяжения одинаково направленных токов, индуцированных в экране и заготовке в областях, соответствующих вырезам в токопроводах.

Выводы. Полученные результаты показали, что

- для снижения амплитуд сил отталкивания заготовки от индуктора, последний должен выполняться с максимально допустимым количеством продольных вырезов при заданной общей ширине всего токопровода;
- в целом, для более эффективного подавления магнитного давления необходимо не только увеличение количества вырезов, но и одновременное увеличение общей ширины токопроводов. Последнее обстоятельство даст возможность снизить действующие силы отталкивания заготовки за счёт увеличения площади взаимодействия. Наличие соответствующего количества вырезов позволит возбудить силы притяжения с амплитудами, достаточными для противодействия «рассеянными» силам магнитного давления, отталкивающим заготовку от индуктора.

1. Бажинов А.В., Батыгин Ю. В., Чаплыгин Е. А., Использование энергии импульсных магнитных полей в автомобильной промышленности. // Сб. научных трудов Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. - Харьков. – 2005. – Выпуск 16. – С. 349-353.
2. Meichtry R., Dent Removing Method and Device. International Patent Application WO2006/119661 A1, 2006.
3. Batygin Y.V., Golovashchenko S.F., Gnatov A.V., Pulsed Electromagnetic Attraction of Sheet Metals – Fundamentals and Perspective Applications. //Journal of Materials Processing Technologies. – Elsevier: 2013. 213, PP. 444-452.

4. Batygin Y.V., Golovashchenko S.F., Gnatov A.V. Pulsed Electromagnetic Attraction of non-magnetic Sheet Metals. Applications. // Journal of Materials Processing Technologies. – Elsevier: 2014. 214, PP. 390-401.
5. Бажинов А.В., Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А., Использование энергии импульсных магнитных полей в автомобильной промышленности. //Сб. научных трудов Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – Харьков. – 2005. – Выпуск 16. – С. 349-353.
6. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 1. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Издание второе, переработанное и дополненное. Под общей ред. д.т.н., проф. Батыгина Ю.В. – Харьков: изд. МОСТ-Торнадо. 2003. – 284 с.
7. Батыгин Ю.В., Бондаренко А.Ю., Силы, действующие на тонкостенный проводник, в проникающем поле плоского одновиткового соленоида. // Техническая электродинамика. 2010. №1. С. 9 – 14.
8. Yuriy V. Batygin, Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov. Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals.//Journal of Materials Processing Technology. – Elsevier. – 2014. № 214 (2). PP. 390–401.

Стаття надійшла до редакції 24.03.2014.