



УДК 621.318

## МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОРПУСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ. ЧАСТЬ 2. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ВНЕШНЕЙ БЕСКОНТАКТНОЙ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ РИХТОВКИ

**Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Трунова И.С.**

*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет*

*В статье проведено обоснование актуальности развития магнитно-импульсной обработки металлов в новом направлении – притяжение заданных участков листовых металлов. Дан краткий обзор основных мировых достижений. Проведен анализ электродинамических процессов при притяжении ферромагнетиков, представлено оборудование, экспериментальные исследования и практическая апробация новых авторских предложений по внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовке корпусных элементов транспортных средств.*

*Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка металлов, магнитно-импульсная установка, бесконтактная рихтовка, удаление вмятин, индуктор.*

**Введение.** Цель изложения второй части – освещение новых авторских предложений по оборудованию для внешней магнитно-импульсной рихтовки кузовов автомобилей.

Вначале их история, описание и принципиальная действенность. Затем – результаты теоретических и экспериментальных исследований физики процессов, направленных на обоснование работоспособности авторских предложений.

Исключительно новые возможности для создания устройств по внешнему устранению вмятин в кузовах легковых автомобилей открыло явление, экспериментально обнаруженное в 2004 г. профессорами Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» Батыгиным Ю. В., Лавинским В. И., Хименко Л. Т. [1]. Его суть состоит в том, что при частотах действующих полей ниже  $\sim 2$  кГц имело место притяжение с образованием вмятины тонкой стальной пластины к рабочей поверхности индуктора-инструмента. При увеличении частоты до  $\sim 7$  кГц и выше образец отталкивался с образованием выпуклости согласно традиционным представлениям о процессах при магнитно-импульсной обработке металлов.

Обнаруженное явление на основании феноменологических соображений и понимания происходящих процессов на уровне того времени позволило запатентовать «Способ магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов» [2], отличающийся от известных аналогов тем, что для притяжения заготовки к индуктору при использовании одного источника импульсного поля частота действующего поля выбирается из условия низкочастотности (1).

$$\omega \ll \frac{1}{\mu_0 \cdot \gamma \cdot d^2}, \quad (1)$$

где  $\omega = 2\pi \cdot f$ ;  $f$  – рабочая частота;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума;  $\gamma$  – удельная электропроводность металла;  $d$  – толщина металла.

Здесь же была зафиксирована геометрия возможных форм индуктора-инструмента. Это мог быть массивный одновитковый соленоид обычной цилиндрической геометрии, а мог быть и массивный одновитковый соленоид с внутренним отверстием в виде усеченного конуса. Размеры внутреннего окна соленоида определяли размеры притягиваемого участка листовой заготовки.

В это же время авторами работы [3] были сформулированы физические основы перспективных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных



металлов и запатентовано другое решение по магнитно-импульсному притяжению, принцип действия которого основан на силовом взаимодействии проводников с одинаково направленными токами (закон Ампера) [4].

В дальнейшем, запатентованный в [4] «Способ магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов», как первое предложение подобного рода, лёг в основу создания «индукционных индукторных систем» (авторское название), различного конструктивного исполнения [5, 6].

**Оборудование бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки.** Принцип действия этих инструментов для магнитно-импульсного притяжения заданных участков поверхности тонкостенных листовых заготовок можно раскрыть с помощью схемы на рис. 1.

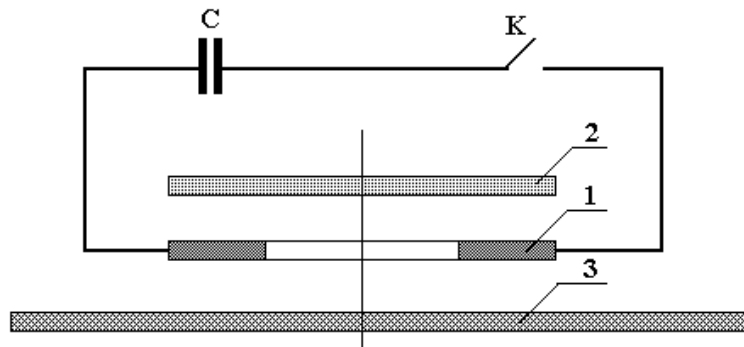


Рисунок 1 – Схема индукционной индукторной системы

Конструктивно, такая система включает плоский одновитковый соленоид-индуктор – 1, дополнительный элемент, обеспечивающий возникновение сил притяжения, это вспомогательный экран – 2 и листовую заготовку – 3, определённый участок которой следует деформировать в направлении к поверхности индуктора.

Все три составляющие укладываются параллельными слоями, изолированно друг от друга: «экран – индуктор – листовая заготовка». Последняя размещается так, чтобы участок, подлежащий деформированию, находился в рабочей зоне системы (в области внутреннего отверстия витка).

Индукционная индукторная система работает следующим образом. Предварительно заряженный емкостной накопитель энергии – С после срабатывания коммутатора – К разряжается в цепи с подключённым соленоидом-индуктором – 1. Разрядный ток индуцирует в металле экрана – 2 и заготовки – 3 вихревые токи, имеющие одинаковое направление. Если экран – 2 жёстко зафиксирован, то, в соответствии с законом Ампера, заготовка – 3 будет притягиваться к рабочей поверхности соленоида-индуктора – 1.

Необходимо подчеркнуть обязательное условие практической работоспособности индукционных индукторных систем. Как следует из физического осмысления закона Ампера (в его связи с давлением на проводник в магнитном поле), силовое взаимодействие между плоскими проводящими листами, в металле которых возбуждаются одинаково направленные индуцированные токи, возможно лишь в режиме интенсивного проникновения электромагнитного поля индуктора сквозь эти листы. Только в этом случае, при нулевом поле между ними, возникают силы магнитного давления извне, обуславливающие их взаимное притяжение.

Принципиальным и общим в предложенных инструментах магнитно-импульсного притяжения тонкостенных металлов является требование низких рабочих частот действующих полей (условие – неравенство (1)). Как показали дальнейшие исследования, это диапазон  $\sim 1 \dots 2$  кГц и ниже.



Далее, для работы инструмента необходим источник мощности. В специальной литературе – это магнитно-импульсная установка. В аббревиатуре – МИУ. В этой части есть свои особенности и требования.

Во-первых, нет жёсткого требования малости собственной индуктивности и, соответственно, высоких значений собственной частоты МИУ, что является обязательным в классике МИОМ. Появляется возможность использования более дешёвых емкостных накопителей энергии.

Во-вторых, требование низких частот генерируемых токов означает, что либо собственная частота магнитно-импульсная установки должна быть достаточно низкой, либо нагрузка разрядного контура должна обладать достаточно высокой индуктивностью. Первый вариант означает повышение величины ёмкости накопителя, второй – использование многovitковых индукторов или одновитковых соленоидов в сочетании с, так называемыми, согласующими устройствами (импульсными трансформаторами тока). Как следует из практики МИОМ, многovitковые соленоиды обладают целым рядом недостатков (сложность в изготовлении, недостаточная прочность, малый эксплуатационный срок и др.). В этой связи наиболее практичным представляется использование массивных одновитковых индукторов и соответствующих согласующих устройств. Применение последних помимо всего прочего позволяет не только регулировать частоты действующих полей, но и увеличить ток собственно в соленоиде.

Одна из возможных конструкций согласующего устройства для работы с одновитковым индуктором защищена патентом [7]. Авторами заявлен способ повышения эффективности цилиндрического согласующего импульсного трансформатора, состоящего из первичной многovitковой обмотки поверх вторичного витка в виде внутреннего полого металлического цилиндра с продольным разрезом, отличающийся тем, что первичную обмотку закрывают сверху экраном в виде внешнего полого металлического цилиндра с продольным разрезом, а одинаковые края разрезов внутреннего и внешнего цилиндров соединяют электрически на выходе к нагрузке так, чтобы суммировались токи, индуцированные в каждом из них.

Наконец, как следует из априорных практических соображений, выполнение рихтовочных операций требует подачи дозированных и контролируемых величин электромагнитной энергии в рабочую зону инструмента. В этой связи представляется целесообразной работа источника мощности – МИУ в режиме многократного повторения генерируемых импульсов тока. Это даёт возможность воздействовать на устраняемую вмятину с наперёд заданным количеством силовых импульсов притяжения.

Объективности ради следует отметить, что многократное воздействие на обрабатываемый объект упоминается в разработках американских фирм «Electroimpact» и «Fluxtronic». Но соответствующие публикации и патенты с авторством этих фирм в современной научной периодике отсутствуют.

Разработки различных конструктивных элементов источников мощности, обеспечивающих работу в режиме генераторов с регулируемым многократным повторением импульсов тока, описаны в патентах [8-12].

Принципиально, их действенность описывается следующим образом. Батарея конденсаторов заряжается до заданного уровня напряжения от сети ~ 220В/380В. После чего происходит разряд на нагрузку – индукторную систему. Затем процесс заряд – разряд повторяется. Контроль и управление работой установки осуществляется с помощью специально разработанной тиристорной схемы. Как показали эксперименты, при уровне зарядных напряжений ~ 1.5...2 кВ работа с сетью позволяет на выходе установки получить частоту повторения генерируемых токовых импульсов порядка ~ 3...9 Гц.

Естественно, что необходимый уровень зарядных напряжений конденсаторной батареи определяется прочностными характеристиками объекта обработки. При каждом силовом воздействии из серии импульсов, создаваемые в нём внутренние механические напряжения должны хоть немного, но превышать пределы текучести обрабатываемых



металлов. В этом случае каждый последующий удар из серии будет только увеличивать относительные деформации.

Особое внимание следует обратить на предложение использовать в источниках мощности в качестве накопителей электромагнитной энергии, так называемые, ионисторы [13]. Последние обладают целым рядом преимуществ по сравнению с традиционными батареями конденсаторов. Это малые габариты при довольно высоком уровне запасаемой энергии, возможность получения больших импульсных токов, характерных для магнитно-импульсной обработки металлов и др.

Далее, вкратце, теория и эксперименты в авторских исследованиях принципов магнитно-импульсного притяжения предложенными инструментами с разной физикой протекающих процессов.

**Притяжение ферромагнетиков.** Гипотеза, объясняющая обнаруженный эффект, впервые представленный в [1], основана на следующих положениях, достоверность которых обоснована в работах [14, 15].

1. Притяжение ферромагнетика, обусловленное его магнитными свойствами, в большей или меньшей степени существует всегда. В диапазоне рабочих значений напряжённости действующих полей ( $H_m \sim 10^5 \div 10^7$  А/м) для тонкостенного листового ферромагнетика величина относительной магнитной проницаемости  $\mu_r \rightarrow 1$ , но  $\mu_r \neq 1$  и  $\mu_r > 1$ . Кстати, это утверждение присутствует и в патентах [16, 17], на основании которых исследуемый эффект был реализован в практике рихтовки автомобильных кузовов. Авторы цитируемых патентов утверждают, что для проявления магнитных свойств для притяжения вполне достаточно, чтобы  $\mu_r > 1.2$ .

2. В режимах резкого скин-эффекта силы магнитного притяжения относительно малы. Здесь преобладают силы Лоренцевского отталкивания. Их амплитуда пропорциональна квадрату тока в индукторе. Имеет место известное магнитно-импульсное давление на обрабатываемый проводящий объект. Заготовка отталкивается от индуктора – источника поля.

3. При низких значениях рабочих частот силы магнитного притяжения преобладают над силами Лоренцевского отталкивания, интегральная действенность последних стремится к нулю. Заготовка притягивается к индуктору – источнику поля именно за счёт влияния магнитных свойств обрабатываемого объекта.

Теоретическая модель исследуемых процессов согласно работам [18, 19], где дано подробное обоснование, построена на следующих допущениях (рис. 2).

1. Виток индуктора достаточно тонок и «прозрачен» для действующих полей ( $\Delta \rightarrow 0$ ), так что его металл не оказывает никакого влияния на протекающие электромагнитные процессы.

2. В индукторе течёт ток  $I(t)$ , временные параметры которого таковы, что в расчётах вполне приемлемо известное условие квазистационарности происходящих электромагнитных процессов, так что  $\omega / c \cdot \ell \ll 1$  (здесь  $\omega$  – циклическая (круговая) частота процесса,  $c$  – скорость света в вакууме,  $\ell$  – наибольший характерный геометрический размер системы).

3. Система обладает аксиальной симметрией, так что  $\partial/\partial\phi = 0$  ( $\phi$  – полярный угол).

4. Листовая заготовка является достаточно тонкостенной с геометрической и электродинамической точек зрения, а её радиальная протяжённость также достаточно велика, то есть  $d/R_{1,2} < 1$  и  $\omega \cdot \tau < 1$  ( $\tau = \mu_1 \cdot \gamma \cdot d^2$  – характерное время проникновения поля в слой толщиной –  $d$ , с удельной электропроводностью –  $\gamma$  и магнитной проницаемостью –  $\mu_1$ ;  $R_{1,2}$  – внутренний и внешний радиусы индуктора).



5. Магнитная проницаемость металла листовой заготовки постоянна и равна  $\mu_1$ ,  $\mu_1 = \mu_0 \cdot \mu_r$ ,  $\mu_0$  и  $\mu_r$  – магнитная проницаемость вакуума и относительная магнитная проницаемость металла, соответственно.

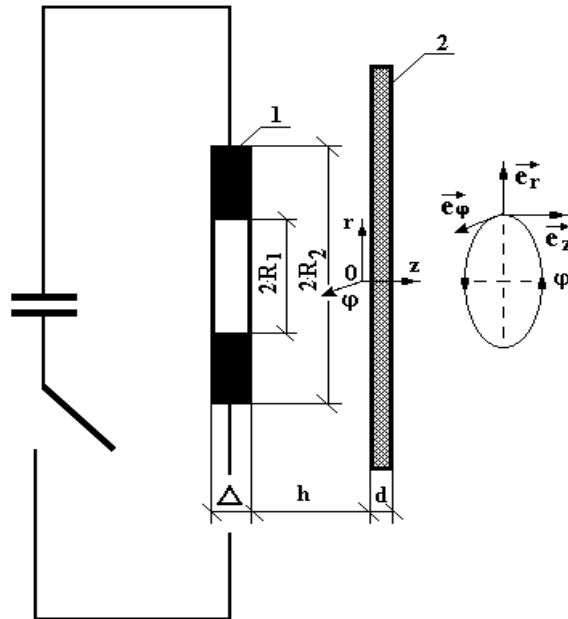


Рисунок 2 – Расчётная модель экспериментальной индукторной системы с одновитковым соленоидом – 1 и плоской листовой ферромагнитной заготовкой – 2  
( $\vec{e}_r, \vec{e}_\phi, \vec{e}_z$  – направляющие орты цилиндрической системы координат)

Не останавливаясь на математических операциях по интегрированию уравнений Максвелла, запишем окончательные выражения для токов и полей, возбуждаемых в металле листового ферромагнетика.

Плотность тока:

$$j_\phi(\zeta, r, \phi) = \frac{2 \cdot j_m}{d} \cdot \int_0^\infty f(x) \cdot e^{-x \cdot \frac{h}{d}} \cdot x \cdot J_1\left(x \cdot \frac{r}{d}\right) \times \sum_{k=0}^\infty \frac{\beta_k \cdot F_{1k}(\mu_r \cdot x, \zeta)}{\Phi_k(\mu_r \cdot x)} \cdot \frac{dj(\phi)}{d\phi} * e^{-\frac{(\beta_k^2 + x^2) \cdot \phi}{\omega \tau}} dx, \quad (2)$$

где  $j_m$  и  $j(\phi)$  – амплитудная и временная зависимость тока в индукторе;  $\phi = \omega \cdot t$  – фаза;  $\omega$  – циклическая частота;  $\zeta \in [0, d]$  – пространственная переменная по толщине ферромагнетика на рис. 2;

$f(x) = \frac{1}{d^2} \cdot \int_{R_1}^{R_2} f(r) \cdot r \cdot J_1\left(x \cdot \frac{r}{d}\right) \cdot dr$ ,  $f(r)$  – функция радиального

распределения тока в витке индуктора;  $x$  – переменная интегрирования.  $J_1\left(x \cdot \frac{r}{d}\right)$  –

функция Бесселя первого порядка,  $\beta_k$  – корни уравнения:  $tg(\beta_k) = -\frac{2}{\frac{\beta_k}{\mu_r \cdot x} - \frac{\mu_r \cdot x}{\beta_k}}$ ;

$$F_{1k}((\mu_r \cdot x), z) = (\mu_r \cdot x) \cdot \sin\left(\beta_k \left(1 - \frac{\zeta}{d}\right)\right) + \beta_k \cdot \cos\left(\beta_k \left(1 - \frac{\zeta}{d}\right)\right);$$

$$\Phi_k(\mu_r \cdot x) = \cos(\beta_k) \left[ (\mu_r \cdot x)^2 + 2(\mu_r \cdot x) - \beta_k^2 \right] - 2\beta_k \sin(\beta_k) [1 + (\mu_r \cdot x)].$$

Интересно отметить существование очевидных предельных переходов в свёртке выражения (1), подтверждающих достоверность полученного результата.



$$\frac{dj(\phi)}{d\phi} * e^{-\frac{(\beta_k^2+x^2)\phi}{\omega\tau}} = \int_0^\phi \frac{dj(\zeta)}{d\zeta} \cdot e^{-\frac{(\beta_k^2+x^2)(\phi-\zeta)}{\omega\tau}} d\zeta = \begin{cases} j(\phi), \gamma \rightarrow \infty, \\ \frac{dj(\phi)}{d\phi}, \gamma \rightarrow 0. \end{cases}$$

В режимі різкого поверхнового ефекта ( $\gamma \rightarrow \infty$ ) часова форма індукційованого току і току індуктора збігаються між собою. В режимі інтенсивного проникнення поля ( $\gamma \rightarrow 0$ ) індукційований ток пропорційний похідній збуджуючого току [14].

Компоненти напруженності магнітного поля:

а) тангенціальна складова

$$H_r(\zeta, r, \phi) = -\frac{2 \cdot j_m}{(\omega \cdot \tau)} \int_0^\infty f(x) \cdot e^{-x \frac{h}{d}} x \cdot J_1\left(x \cdot \frac{r}{d}\right) \times \sum_{k=0}^\infty \frac{\beta_k^2 \cdot F_{2k}(\mu_r \cdot x, \zeta)}{\Phi_k(\mu_r \cdot x)} j(\phi) * e^{-\frac{(\beta_k^2+x^2)\phi}{\omega\tau}} dx, \quad (3)$$

де  $F_{2k}(\mu_r \cdot x, \zeta) = (\mu_r \cdot x) \cdot \cos\left(\beta_k \left(1 - \frac{\zeta}{d}\right)\right) - \beta_k \cdot \sin\left(\beta_k \left(1 - \frac{\zeta}{d}\right)\right)$ ;

б) нормальна складова

$$H_z(\zeta, r, \phi) = -\frac{2 \cdot j_m}{(\omega \cdot \tau)} \int_0^\infty f(x) \cdot e^{-x \frac{h}{d}} x^2 \cdot J_0\left(x \cdot \frac{r}{d}\right) \times \sum_{k=0}^\infty \frac{\beta_k \cdot F_{1k}(\mu_r \cdot x, \zeta)}{\Phi_k(\mu_r \cdot x)} j(\phi) * e^{-\frac{(\beta_k^2+x^2)\phi}{\omega\tau}} dx, \quad (4)$$

де  $J_0\left(x \cdot \frac{r}{d}\right)$  – функція Бесселя нульового порядку.

Отже, вирази (2)–(4) описують розподіли характеристик електромагнітних процесів в досліджуваній індукторній системі для довільної часової форми збуджуючого току в індукторі.

Просторово-часова залежність магнітного тиску, діючого на провідячу ферромагнітну пластину, має вигляд [18, 20]:

$$P_L(r, t) = -\mu_1 \cdot \int_0^d j_\phi(\zeta, r, t) \cdot H_r(\zeta, r, t) \cdot d\zeta. \quad (5)$$

Формула (5), доповнена виразами (2) і (3) представляє собою рішення задачі про збудженні сил Лоренца, діючих в напрямку нормалі до поверхні оброблюваного об'єкта.

Поверхнева густина сил, обумовлених магнітними властивостями металу тонкостінної пластини, описується виразом виду:

$$P_F = -\frac{(\mu_0 \cdot \mu_r)}{2} \cdot (\mu_r - 1) \cdot \left[ (H_{1z}^2 - H_{2z}^2) + \frac{1}{\mu_r} \cdot (H_{1r}^2 - H_{2r}^2) \right], \quad (6)$$

де  $H_{1,2z}$  і  $H_{1,2r}$  – «z» і «r» – складова напруженності магнітного поля на поверхнях ферромагнітного листа з боку індуктора (індекс – 1) і з протилежної сторони (індекс – 2).

Аналіз виразу (6) показує, що:

– на металічну пластину з магнітними властивостями, що знаходиться в вакуумі, діє результуюча сила, пропорційна різниці квадратів нормальної і тангенціальної складових напруженності на границях і направлена в бік більшого значення амплітуди магнітного поля, на відміну від сил Лоренца, направлених протилежно;



– в режимі насичення при  $\mu_r \gg 1$  дійсуюча сила буде визначатися в основному нормальними компонентами напруженности магнитного поля, що знову ж повністю згодиться з известними науковими положеннями.

Перевірку сформулированої гіпотези о природі змєнення напрямленности сил, дійсуючих на ферромагнетик, при понижєнні робочих частот можна здійснити численними оцєнками з допомогою вираження, представляючого собою сумму сили Лорєнца (формула (5)) и сили, обусловленої магнитними своємствами металла оброблюваної пластини (формула (6)):

$$P_s(r,t) = \mu_1 \left( \int_0^d j_\phi(z,r,t) \cdot H_r(z,r,t) \cdot dz - \frac{(\mu_r - 1)}{2} \times \left[ (H_{1z}^2 - H_{2z}^2) + \frac{1}{\mu_r} (H_{1r}^2 - H_{2r}^2) \right] \right). \quad (7)$$

Численні оцєнки проведєм для одної из експериментальних індукторних систем з параметрами: виток –  $R_1 = 0.025$  м,  $R_2 = 0.03$  м; робочий зазор между витком індуктора и листової заготовкє –  $h = 0.0005$  м.

Листовая заготовкє – сталь з удєльною електропровідністю  $\gamma = 0.4 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$  и товщиною  $d = 0.00075$  м. Величина относительної магнитної проникємости соотвєтствует усреднєнным оцєнкам по кривим науковї монографії [23] для значєний напруженности магнитного поля  $\sim 10^5$  А/м и соотвєтствует  $\mu_r \approx 2.5$ .

Амплитуда експонєнциально затухаючого тока в індукторє –  $I_m = 50$  кА, частота в імпульсє –  $f = 2 \dots 8$  кГц, относительний декремент затухання –  $\delta_0 = 0.3$ .

Вичислення возбуждаємых сил различной физическєй природи проведєны з допомогою формул: (5) – сили Лорєнца –  $P_L$  (распределєнные силы взаємодєйствія внешнего магнитного поля с індукцированными токами); (6) – распределєнные силы магнитного притяжения –  $P_M$ ; (7) – суммарные распределєнные силы, дійсующие на ферромагнитную металличєскую пластину в магнитном полє –  $P_s$ .

Результати расчєтов представлєны в виде графиков на рис. 3-5.

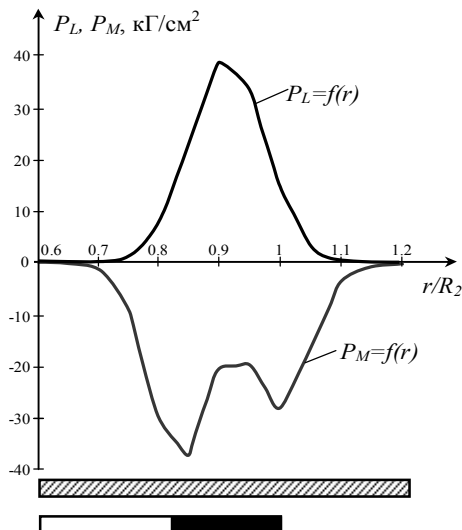


Рисунок 3 – Радиальные распределения сил, возбуждаємых в металле тонкостєнной ферромагнитной пластини при частоте  $\sim 2$  кГц

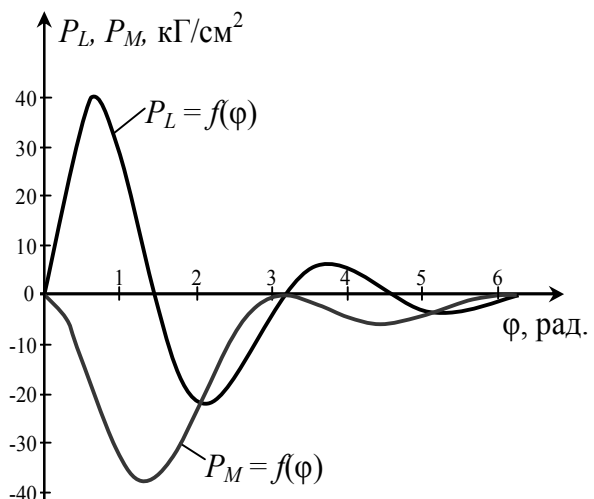


Рисунок 4 – Зависимости распределєнных сил от фазы, возбуждаємых в металле тонкостєнной ферромагнитной пластини при частоте  $\sim 2$  кГц



Приведенные графические зависимости иллюстрируют рост сил магнитного притяжения по сравнению с силами отталкивания при понижении рабочей частоты действующего поля и увеличение действенности последних при повышении частот. Анализируя полученные графические зависимости для распределенных сил следует отметить:

1. Максимумы сил отталкивания и притяжения разнесены во времени (рис. 4, рис. 5а). Так, амплитуда сил магнитного притяжения имеет место при  $\phi_{\max, M} \approx 1.256$  вне зависимости от частоты. Силы отталкивания достигают экстремальных значений при  $\phi_{\max, L} \approx 0.628$  для  $\sim 2$  кГц и при  $\phi_{\max, L} \approx 0.942$  для  $\sim 8$  кГц, что обусловлено влиянием временной формы индуцированного тока;

2. Максимумы этих сил разнесены в пространстве (рис. 3, рис. 5б). Радиальные экстремумы сил отталкивания расположены по центру витка. Силы притяжения достигают максимума вблизи его внутреннего края.

Весьма иллюстративны и показательны графические результаты вычислений суммарной силы (сила Лоренца плюс сила магнитного притяжения), представленные на рис. 6.

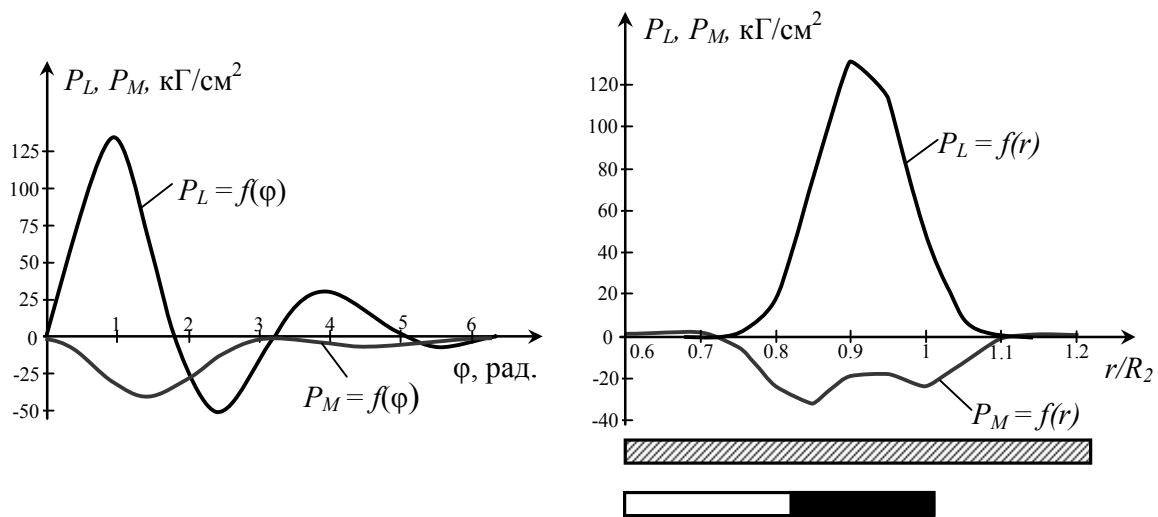


Рисунок 5 – Распределенные силы, возбуждаемые в металле тонкостенной ферромагнитной пластины при частоте  $\sim 8$  кГц: а – зависимость от фазы; б – радиальное распределение

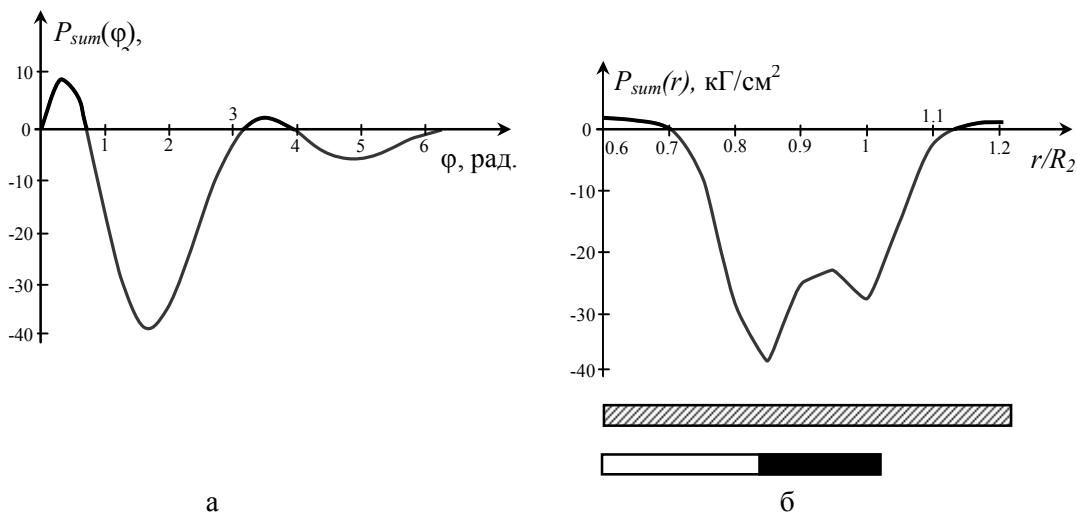


Рисунок 6 – Зависимости суммарной распределённой силы при частоте  $\sim 2$  кГц (силы отталкивания – выше нуля, силы притяжения – ниже нуля): а – фазовая, б – радиальная





Наконец, весьма представительной характеристикой для сравнения может быть величина интегральной силы (в выбранном радиальном интервале), усреднённая за период действующего поля. Результаты этих вычислений приведены на рис. 7.

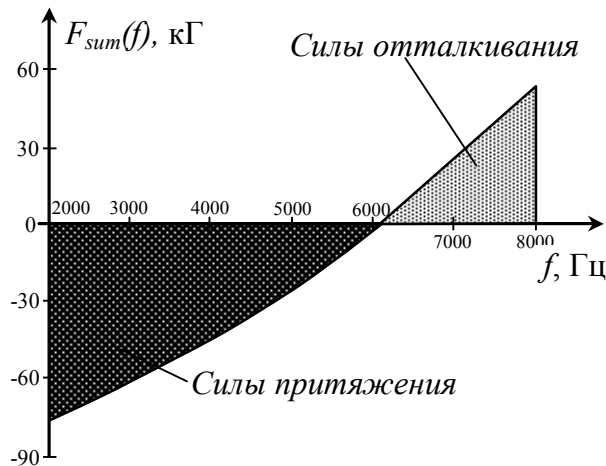


Рисунок 7 – Частотная зависимость усреднённой суммарной силы, действующей на ферромагнитную пластину, в магнитном поле одновиткового индуктора

Заключительные комментарии по проведенным вычислениям. Силы взаимодействия внешнего магнитного поля с индуцированными токами (силы Лоренца) имеют осциллирующий характер во времени, что означает их переменную направленность. Интегральное действие этих сил на проводник за время импульса – есть отталкивание обрабатываемого объекта от источника поля – индуктора. С понижением рабочей частоты осцилляции сил Лоренца во времени возрастают и, в конечном итоге, их отталкивающее интегральное воздействие на объект обработки стремится к нулю.

Силовое воздействие внешнего поля на проводник с магнитными свойствами сохраняет неизменным свой знак во времени. Это означает, что данные силы имеют постоянное направление. Их действие на проводник – есть притяжение обрабатываемого объекта к индуктору. Максимумы сил отталкивания и притяжения разнесены во времени и в пространственном приложении. Данные различия обусловлены разными физическими механизмами возбуждения выделенных сил, и, практически, они могут стать причинами неоднородного деформирования ферромагнитных листовых заготовок при воздействии импульсных магнитных полей.

При повышении рабочих частот действующих полей, амплитуды сил отталкивания существенно возрастают, амплитуды сил магнитного притяжения – падают. Силовое воздействие низкочастотных полей на ферромагнитные листовые металлы почти неизменно во времени. Практически, имеет место только притяжение к индуктору.

Проведенные вычисления подтверждают достоверность физического механизма, принятого для объяснения первых экспериментов [5], в ходе проведения которых наблюдалось изменение направленности силового воздействия на стальные тонкостенные листовые заготовки в зависимости от рабочей частоты магнитного поля одновиткового цилиндрического соленоида, а именно, при понижении частоты от  $\sim 8$  кГц до  $\sim 2$  кГц известное магнитное отталкивание сменялось притяжением объекта обработки к индуктору. Действительно, как следует из зависимости на рис. 7, в диапазоне рабочих частот 2...8 кГц изменяется характер силового воздействия на ферромагнитную пластину. Для  $f > 6$  кГц превалирует притяжение, для  $f < 6$  кГц – отталкивание. Можно добавить, что в проведенных экспериментах, притяжение наблюдалось ещё при частоте  $f \approx 4.5$  кГц.

Достоверность теоретических результатов о влиянии магнитных свойств обрабатываемых объектов на характер возбуждаемых усилий подтверждается новыми экспериментальными данными. Подробное описание приведено в работах [21, 22].



**Экспериментальное оборудование.** Источник мощности – сильноточный генератор в режиме многократного повторения токовых импульсов с частотой их следования  $\sim 10$  Гц (рис. 8), созданный в лаборатории электромагнитных технологий кафедры физики Харьковского автомобильно-дорожного университета, с запасаемой энергией до  $\sim 2$  кДж, рабочим напряжением  $\sim 100\dots 2000$  В, собственной частотой  $f_0 \approx 7$  кГц, собственной индуктивностью  $L_0 \approx 430 \cdot 10^{-9}$  Гн.

Согласующее устройство – импульсный трансформатор тока. Согласующее необходимо для согласования источника мощности – магнитно-импульсной установки с инструментом обработки – индукторной системой, что приводит к эффективному выполнению заданной технологической операции.

Индуктор – массивный одновитковый соленоид с внутренним отверстием конического профиля, подключаемый к источнику мощности через согласующее устройство (импульсный трансформатор тока с коэффициентом трансформации  $\sim 5$ ), позволяющее получить рабочую частоту токового импульса в цепи индуктора  $\sim 1.8\dots 2.0$  кГц.

Экспериментальные образцы – тонкие пластины из стали кузова а/м «Субару», «Ситроен» и немагнитной нержавеющей стали.



Рисунок 8 – Экспериментальное оборудование для исследования магнитно-импульсного притяжения листовых ферромагнетиков:

1 – согласующее устройство с индуктором; 2 – кабельный подвод; 3 – источник мощности (МИУ); 4 – электронный блок управления

Авторским коллективом лаборатории электромагнитных технологий Харьковского национального автомобильно-дорожного университета (ХНАДУ) разработан целый ряд согласующих устройств, использование которых позволило выполнять ранее трудно реализуемые, а порой и невозможные технологические операции по восстановлению (удалению вмятин, прогибов, деформаций) кузовов автомобилей [18, 19]. Это открывает совершенно новые возможности в обрабатывающей промышленности, т.к. операции по реставрации могут быть выполнены бесконтактно и без разборки кузовных элементов транспортных средств.

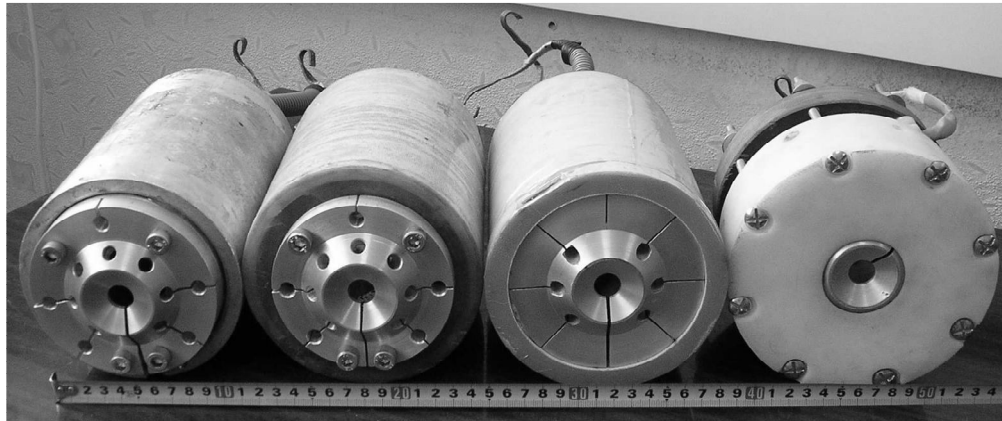
На рис. 9 представлены разработанные согласующие устройства: рис. 9, а, б, в – цилиндрического типа; рис. 9, г – дискового типа.

Совмещенными называются такие согласующие устройства, в которых вторичная обмотка совмещена с индуктором-инструментом [18, 19].



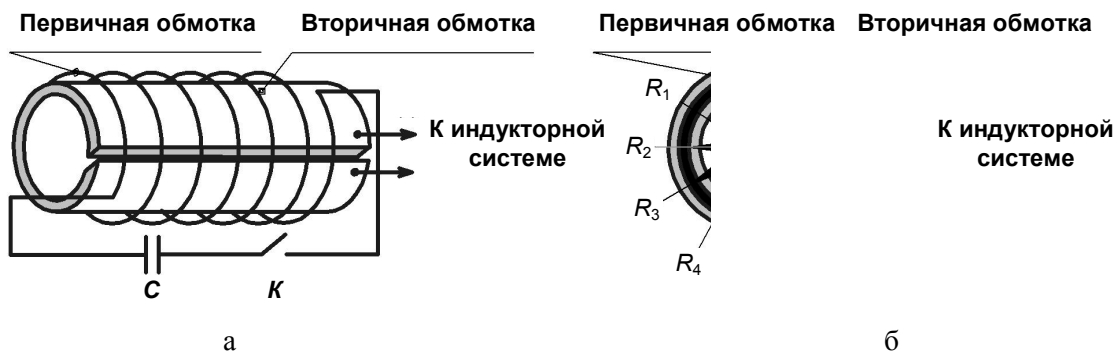
Нижче, на рис. 10, для більшої ясності представлено схемотехнічне рішення для циліндричного согласуючого пристрою – імпульсного трансформатора струму з двома вторичними розімкнутими витками [18].

В нинішнє час в лабораторії електромагнітних технологій ХНАДУ розроблено декілька індукторів (індукторних систем), дозволяють виробляти магнітно-імпульсне вплив на оброблюваний об'єкт з метою виконання заданої технологічної операції.



а б в г

Рисунок 9 – Зовнішній вигляд досліджуваних согласуючих пристроїв: а – циліндричне согласуюче з двома вторичними розімкнутими витками; б – циліндричне согласуюче з одним вторичним розімкнутим витком; в – збіжене циліндричне согласуюче; г – збіжене дисківне согласуюче



а

б

Рисунок 10 – Схемотехнічне рішення циліндричного согласуючого пристрою з двома вторичними розімкнутими витками: а – вторичний виток – порожній циліндр з продольним розрізом з розташованою зверху первичною обмоткою; б – вторичний виток – два коаксіальні порожні циліндри, між якими розміщується первична обмотка (поперечний переріз)

**Експериментальні результати.** Учаски експериментальних зразків в робочій зоні індуктора – інструмента підвергалися магнітно-імпульсному притягненню, результатом якого повинно було стати витягування вм'ятин на рівній поверхні сталевих пластин.

Робоче напруга  $\sim 1800$  В, робоча частота  $\sim 1.9$  кГц, амплітуда струму в індукторі  $\sim 88$  кА. Експериментальні зразки після 50-ти кратного повторення силового впливу представлені на рис. 11.

Поперечні розміри отриманих вм'ятин відповідали розмірам робочої зони індуктора  $\sim 40$  мм Їх глибина складала  $\sim 1.2 \dots 1.5$  мм. Різниця в глибині отриманих вм'ятин, незважаючи на ідентичність в умовах проведених експериментів, можна пояснити ймовірними відмінностями електрофізических і механічних характеристик сталей різних виробників.

Зразок з немагнітної сталі не мав жодних слідів силового впливу – ні притягнення, ні відштовхування.



Таким образом, проведенные эксперименты подтвердили преобладающую действенность сил притяжения по отношению к тонкостенным металлическим образцам, обладающим магнитными свойствами, и отсутствие какого либо силового воздействия на образцы из немагнитных металлов.

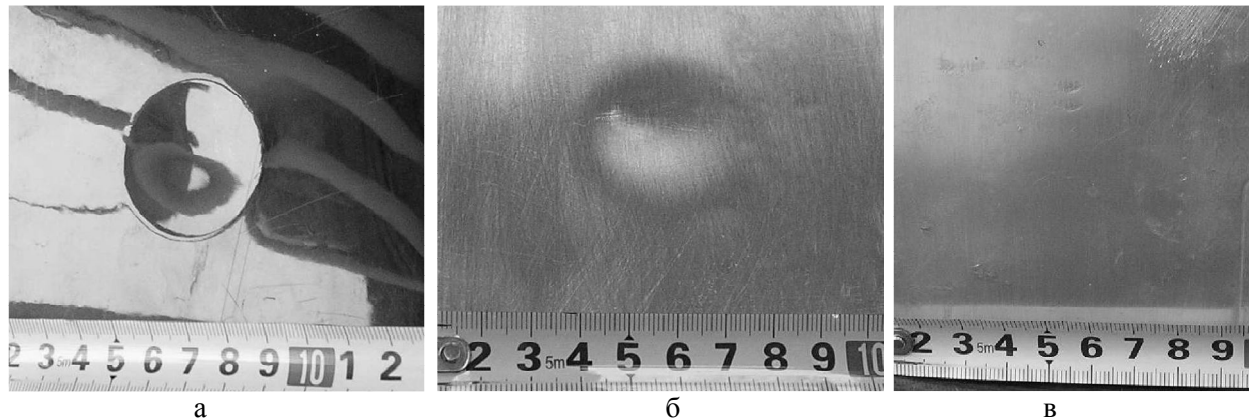


Рисунок 11 – Экспериментальные образцы после магнитно-импульсного притяжения: а – сталь автомобиля «Субару»; б – сталь автомобиля «Ситроен»; в – немагнитная сталь

В целом, полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований можно обобщить следующими утверждениями.

1. Предложен, сформулирован, теоретически и экспериментально обоснован физический механизм силового воздействия импульсных магнитных полей на тонкостенные листовые заготовки из ферромагнитных проводников.

2. Показано, что при низких рабочих частотах действующих полей преобладают силы притяжения, обусловленные магнитными свойствами металла обрабатываемых объектов. При повышении частот сверх определённого порогового значения изменяется характер силового воздействия. Притяжение сменяется отталкиванием, обусловленным преобладающим влиянием сил Лоренца – сил взаимодействия внешнего поля с индуцированными токами.

3. Предложенный механизм силового взаимодействия магнитных полей с тонкостенными ферромагнитными проводниками объясняет результаты первых экспериментов [5], где был зафиксирован эффект изменения направленности силового воздействия на стальные тонкостенные листовые заготовки в зависимости от рабочей частоты магнитного поля одновиткового цилиндрического соленоида.

В заключение о технологических возможностях. С помощью экспериментального оборудования на рис. 12 отрабатывалась модельная производственная операция по удалению вмятины в кузовной стали автомобиля «Субару».

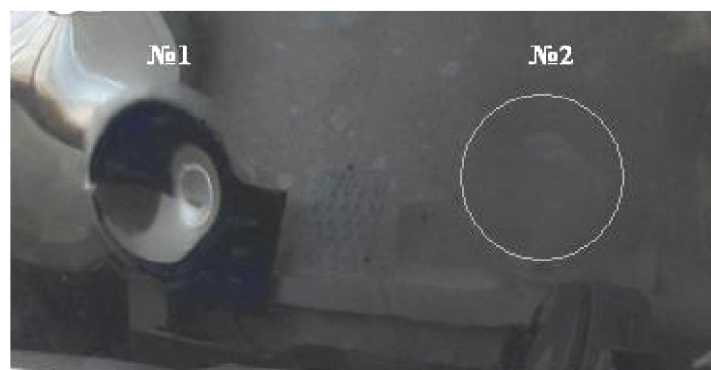


Рисунок 12 – Экспериментальный образец магнитно-импульсного удаления вмятины: №1 – контрольная вмятина; №2 – удалённая вмятина

В процессе эксперимента вначале из ровного листового образца вытягивались две идентичные вмятины. Далее углублением в одной из них образец поворачивался



к рабочей поверхности индуктора. Вторая вмятина являлась контрольной. Металл удаляемой вмятины подвергался магнитно-импульсному воздействию. После серии импульсов притяжения вмятина удалялась, поверхность листового образца возвращалась, практически, в первоначальное состояние.

**Выводы:**

1. Представлено разработанное оборудование по бесконтактной магнитно-импульсной рихтовке и показаны его технологические возможности.
2. Создание источников электромагнитной мощности, позволяющих осуществлять многократное силовое воздействие серией силовых импульсов на заданный участок обрабатываемого объекта, что даёт возможность не только контролировать процесс притяжения, но и понизить уровень энергии, необходимый для реализации выполняемой производственной операции.
3. Создание инструментов для притяжения ферромагнетиков (различные автомобильные стали), принцип действия которых основан преваляровании сил притяжения, обусловленных магнитными свойствами обрабатываемых металлов, над силами Лоренцевского отталкивания при понижении рабочих частот действующих полей (экспериментально обнаруженный эффект изменения направленности силового воздействия при вариации частот действующих полей).
4. Создание инструментов для притяжения немагнитных металлов (алюминиевые сплавы), принцип действия которых основан на силовом взаимодействии проводников с одинаково направленными индуцированными токами (закон Ампера) в, так называемых, «индукционных индукторных системах», где введение дополнительного вспомогательного экрана позволяет возбудить электродинамические усилия, притягивающие заданный участок обрабатываемого объекта к индуктору-источнику поля.
5. Создание инструментов – индукторных систем с комбинированным принципом действия, позволяющих эффективное притяжение как немагнитных, так и магнитных металлов.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Batygin Yu. V. Direction Change of the Force Action upon Conductor under Frequency Variation of the Acting magnetic Field / Yu. V. Batygin, V. I. Lavinsky, L. T. Khimenko // Proceedings of the 1-st International Conference on High Speed Metal Forming. March 31/April 1, 2004. – Dortmund, Germany. – P. 157-160.
2. Пат. 75676 Україна, МПК В 21 D 26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок / Батигін Ю. В., Лавінський В. І., Хименко Л. Т. ; заявник та патентовласник ХПІ. – № 2004010512 ; заявл. 23.01.04; опубл. 15.05.06, Бюл. № 5.
3. Батыгин Ю. В. Физические основы возможных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов. / Ю. В. Батыгин, В. И. Лавинский, Л. Т. Хименко // Електротехніка і електромеханіка. – Харків, 2004. – № 2. – С. 80-84.
4. Пат. 74909 Україна, МПК В 21 D 26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок / Батигін Ю. В., Лавінський В. І., Хавін В. Л. ; заявитель и патентообладатель ХПИ. – № 2004010542 ; заявл. 26.01.04; опубл. 15.02.06, Бюл. № 2.
5. Пат. 31751 України, В 21 D 26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки металевих заготовок методом притягання до індуктора / Батигін Ю. В., Бондаренко О. Ю., Чаплигін Є. О. ; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u200712252; заявл. 05.11.2007; опубл. 25.04.08, Бюл. №8.
6. Пат. 31752 України, В 21 D 26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки металевих заготовок / Батыгин Ю. В., Бондаренко А. Ю., Сериков Г. С. ; заявник та



патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u200712252; заявл. 05.11.2007; опубл. 25.04.08, Бюл. № 8.

7. Пат. 53969 України, B21 D 26/14. Узгоджувальний пристрій – циліндричний з двома співвісними вторинними витками / Ю. В. Батигін, А. В. Гнатов, Г. С. Сериков, Є. О. Чаплигін, С. О. Драченко ; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u201004291; заявл. 13.04.2010; опубл. 25.10.2010, Бюл. № 20.

8. Пат. 29175 України, B21D 26/14. Установка для магнітно-імпульсної обробки металів серією імпульсів / Ю. В. Батигін, О. Ю. Бондаренко, В. І. Лавінський, В. Л. Хавін ; заявник та патентовласник Національний технічний університет «ХПІ». – № u200707813; заявл. 11.07.2007 ; опубл. 10.01.2008, Бюл. № 1.

9. Пат. 84925 України, B21D 26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки металевих заготовок / Ю. В. Батигін, О. Ю. Бондаренко ; заявник та патентовласник Національний технічний університет «ХПІ». – № a200612953; заявл. 08.12.2006 ; опубл. 10.06.2008, Бюл. № 11.

10. Пат. 45131 України, B21D 26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки металевих заготовок / Ю. В. Батигін , О. Ю. Бондаренко, В. Л. Хавін ; заявник та патентовласник Національний технічний університет «ХПІ». – № u200905436 ; заявл. 29.05.2009 ; опубл. 26.10.2009, Бюл. № 20.

11. Пат. 44933 України, B21 D 26/14. Генератор багаторазових імпульсів струму для магнітно-імпульсної обробки металів / Ю. В. Батигін, О. Ю. Бондаренко, А. В. Гнатов, Г. С. Сериков, Є. О. Чаплигін ; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u200903072 ; заявл. 01.04.2009 ; опубл. 26.10.2009, Бюл. № 20.

12. Пат. 61008 України, B21 D 26/14. Генератор багаторазових імпульсів струму для магнітно-імпульсної обробки металів з розгалуженим колом комуруючих пристроїв / Ю. В. Батигін, В. В. Воробйов, А. В. Гнатов, А. С. Сосков, Є. О. Чаплигін ; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u201012932; заявл. 01.11.2010; опубл. 11.07.2011, Бюл. № 13.

13. Пат. 61417 України, B21 D 26/14. Генератор багатократних імпульсів струму для обробки металів тиском імпульсного магнітного поля / Ю. В. Батигін, А. В. Гнатов, Є. О. Чаплигін, Щ. В. Гнатова, І. С. Трунова; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u201013096 ; заявл. 04.11.2010 ; опубл. 25.07.2011, Бюл. № 14.

14. Батыгин Ю. В. Вихревые токи в тонких металлических листах при их магнитно-импульсной обработке / Ю. В. Батыгин, В. И. Лавинский, А. Ю. Бондаренко // Электричество. – М., 2009. – № 9. – С. 61-65.

15. Батыгин Ю. В. Силы, действующие на тонкостенный проводник, в проникающем поле плоского одновиткового соленоида. / Ю. В. Батыгин, А. Ю. Бондаренко // Техническая электродинамика. – К., 2010. – № 1. – С. 9-14.

16. Пат US WO/2006/119661. Dent removing method and device / Meichtry Ralph, Kouba Ivan ; заявитель и патентообладатель Rentsch & Partner. – № 60/680,303; заявл. 11,05,2006; опубл. 16.11.2006.

17. Пат. US 2008/0163661 A1 USA (США). Dent removing method and device / Meichtry Ralph, Kouba Ivan ; заявитель и патентообладатель Ostrolenk faber gerb & soffen, New York. – № 11/910,788 ; заявл. 11.05.2006 ; опубл. 10.07.2008.

18. Туренко А. Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями / А. Н. Туренко, Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов. – Т. 3. – Харьков : ХНАДУ, 2009. – 240 с.

19. Батыгин Ю. В. Экспериментальные исследования магнитно-импульсного притяжения тонкостенных листовых металлов / Ю. В. Батыгин, С. Ф. Головащенко, А. В. Гнатов, Д. О. Смирнов // Електротехніка і електромеханіка. – Харків, 2010. – № 3. – С. 39-41.



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

21. Батыгин Ю. В. Направление сил, действующих на листовой ферромагнетик, в зависимости от временных характеристик при МИОМ / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, С. А. Щиголева // Електротехніка і електромеханіка. – Харків, 2011. – № 3. – С. 56-61.

22. Батыгин Ю. В. Притяжение тонкостенных металлических листов магнитным полем одновиткового индуктора / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, С. А. Щиголева // Электричество. – М., 2011. – № 4. – С. 55-62.

23. Туровский Я. Техническая электродинамика / Я. Туровский – М. : Энергия, 1974. – 488 с.

**Батигін Ю.В., Гнатов А.В., Трунова І.С.** МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ КОРПУСНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ. ЧАСТИНА 2. ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗОВНІШНЬОГО БЕЗКОНТАКТНОГО МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОГО РИХТУВАННЯ

*У статті проведено обґрунтування актуальності розвитку магнітно-імпульсної обробки металів у новому напрямку – притягання заданих ділянок листових металів. Надано короткий огляд основних світових досягнень. Проведено аналіз електродинамічних процесів при притяганні ферромагнетиків, представлено обладнання, експериментальні дослідження та практична апробація нових авторських пропозицій по зовнішньому безконтактному магнітно-імпульсному рихтуванню корпусних елементів транспортних засобів.*

*Ключові слова: магнітно-імпульсна обробка металів, магнітно-імпульсна установка, безконтактне рихтування, видалення вм'ятин, індуктор.*

**Batygin Yu.V., Hnatov A.V., Trunova I.S.** THE MAGNETIC-PULSE TECHNOLOGIES FOR RENEWAL OF THE TRANSPORT BODY ELEMENTS. PART 2. THE EQUIPMENT FOR PRACTICAL REALIZATION OF EXTERNAL NONCONTACT MAGNETIC-PULSE STRAIGHTENING

*The substantiation for actuality of magnetic-pulse metal working development in new direction – attraction of defined sections of sheet metals has been carried out in this article. The brief review of main world achievements was conducted. The analysis of electrodynamic processes of ferromagnetics attraction has been carried out, the equipments have been demonstrated. The experimental researches and practical approbation of new authors proposals for external noncontact magnetic-pulse straightening of the transport body elements have been presented.*

*Key words: electromagnetic forming, magnetic-pulse installation, noncontact straightening, dents removal, inductor.*

Статтю прийнято  
до редакції 23.11.2012