

СИЛЫ ПРИТЯЖЕНИЯ В УНИВЕРСАЛЬНОМ ИНСТРУМЕНТЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ РИХТОВКИ

Гнатюк А.В.

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

В последнее время все более высоким спросом пользуются операции по ремонту и восстановлению кузовных панелей автомобилей. Особый интерес представляют устройства, позволяющие провести, внешнюю рихтовку без разборки кузова автомобиля и нарушения существующего защитного покрытия. К таким инструментам относятся индукционные индукторные системы – универсальные инструменты внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки. Принцип действия данных индукторных систем основан на законе Ампера, по которому проводники с коллинеарными одинаково направленными токами притягиваются друг к другу. Одним из наиболее важных вопросов при выборе определенной конструкции таких индукторных систем, является исследование в них электродинамических процессов с определением возбуждаемых усилий. Их характер протекания в соответствии с конструктивными особенностями определяют эффективность и работоспособность индукционных индукторных систем, как универсального инструмента внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки. В работе проведен анализ электродинамических процессов в индукционной индукторной системе с идентичными ферромагнитными металлами обрабатываемой заготовки и вспомогательного экрана. Получены аналитические выражения для расчета сил притяжения Ампера и сил притяжения, обусловленных магнитными свойствами обрабатываемого металла. Полученные результаты проиллюстрированы численными оценками для реальных ситуаций в практике внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки.

Ключевые слова: *внешняя рихтовка, удаление вмятин, кузовной ремонт, магнитно-импульсная обработка металлов, кузовная панель.*

Постановка проблемы. В настоящее время все большим спросом пользуются операции по реставрации кузовных панелей автомобилей. Причём, до 80% повреждений приходится на небольшие и средние повреждения. Половина из них – это вмятины, не требующие замены всего элемента и устраняемые рихтовкой. Более 50% таких повреждений составляют зоны с затрудненным или полностью закрытым обратным доступом. В этой связи особый интерес представляют устройства, позволяющие произвести, внешнюю рихтовку без разборки кузова автомобиля и нарушения существующего защитного покрытия [1, 2].

Особенный интерес представляют инструменты, позволяющие производить рихтовку кузовных панелей автомобилей выполненных, как из ферромагнитных, так и неферромагнитных металлов. К таким инструментам относятся индукционные индукторные системы (ИИС) – универсальные инструменты внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки [3, 4].

Анализ основных достижений и публикаций. В основу принципа действия ИИС положен закон Ампера, по которому проводники с коллинеарными одинаково направленными токами притягиваются друг к другу [5–8]. В отличие от индукторных систем, основанных на естественном притяжении ферромагнетиков при понижении рабочих частот действующих полей, ИИС представляют собой техническое решение. Здесь, помимо собственно индуктора-источника магнитного поля и листовой заготовки – кузовная панель автомобиля, вводится дополнительный конструктивный элемент. Это, так называемый, дополнительный или вспомогательный экран. Он располагается параллельно и симметрично относительно плоскости индуктора обрабатываемому листовому металлу [3, 4, 9, 10]. Если экран и заготовка идентичны, то в них возбуждаются одинаковые токи (речь идёт о величине, временной зависимости и направлении). Их взаимодействие приводит к взаимному притяжению. Но экран жёстко фиксируется. Поэтому деформируется лишь листовая заготовка. Её участок в области внутреннего окна будет притягиваться к индуктору [11–14].

Одним из наиболее важных вопросов при выборе определенной конструкции ИИС, является исследование в ней электродинамических процессов с определением возбуждаемых усилий. Т.к. их характер и протекание, в соответствии с конструктивными особенностями определяют эффективность и работоспособность ИИС, как универсального инструмента внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки автомобильных кузовов [15, 16].

Цель работы – расчет электродинамических процессов в индукционной индукторной системе с идентичными ферромагнитными металлами кузовной панели и вспомогательного экрана – универсальном инструменте магнитно-импульсной рихтовки автомобильных кузовов.

Расчетные соотношения. Расчётную модель универсального инструмента магнитно-импульсной рихтовки автомобильных кузовов представлена на рис. 1 [11, 15–17].

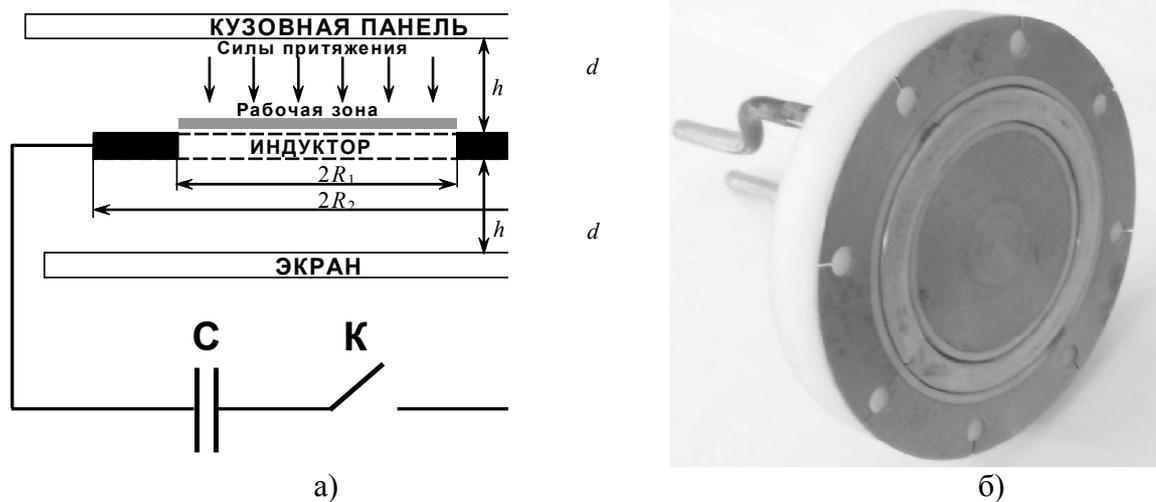


Рисунок 1 – Универсальный инструмент магнитно-импульсной рихтовки:
а – расчётная модель, б – физическая реализация

Не останавливаясь на математических операциях по решению уравнений Максвелла, составленных для возбуждаемых составляющих вектора электромагнитного поля ($E_\varphi \neq 0$, $H_{r,z} \neq 0$), перепишем из авторской работы [15, 17] полученные аналитические выражения для нормальной и тангенциальной компоненты напряженности магнитного поля:

$$H_r^{(2)}(\varphi, r, \zeta) = \frac{j(\varphi)}{2\mu_r} \int_0^\infty \frac{F(x) J_1\left(x \frac{r}{d}\right)}{x} \cdot \frac{\left(ch\left(x \cdot \frac{\zeta-d}{d}\right) - \frac{1}{\mu_r} \cdot sh\left(x \cdot \frac{\zeta-d}{d}\right) \right)}{sh(x) \left[sh\left(x \cdot \frac{h}{d}\right) + \frac{1}{\mu_r^2} ch\left(x \cdot \frac{h}{d}\right) \right] + \frac{1}{\mu_r} \cdot e^{x \frac{h}{d}} \cdot ch(x)} \cdot dx \quad (1)$$

$$H_z^{(2)}(\varphi, r, \zeta) = \frac{j(\varphi)}{2\mu_r} \int_0^\infty \frac{F(x) J_0\left(x \frac{r}{d}\right)}{x} \cdot \frac{\left(sh\left(x \cdot \frac{\zeta-d}{d}\right) - \frac{1}{\mu_r} \cdot ch\left(x \cdot \frac{\zeta-d}{d}\right) \right)}{sh(x) \left[sh\left(x \cdot \frac{h}{d}\right) + \frac{1}{\mu_r^2} ch\left(x \cdot \frac{h}{d}\right) \right] + \frac{1}{\mu_r} \cdot e^{x \frac{h}{d}} \cdot ch(x)} \cdot dx, \quad (2)$$

где $j(\varphi)$ – фазовая зависимость тока в индукторе, $x = \lambda \cdot d$ – безразмерная переменная интегрирования $x \in [0, \infty)$, $J_1\left(x \frac{r}{d}\right)$ – функция Бесселя первого порядка,

$$F(x) = \int_{\left(x \cdot \frac{R_1}{d}\right)}^{\left(x \cdot \frac{R_2}{d}\right)} y \cdot J_1(y) dy - \text{ функция равномерного радиального распределения тока}$$

в индукторе, y – переменная интегрирования.

Силы притяжения в рассматриваемом универсальном инструменте магнитно-импульсной рихтовки – это сила притяжения кузовной панели автомобиля, обусловленная действием вспомогательного экрана (взаимное притяжение проводников с индуцированными токами) и сила притяжения, обусловленная магнитными свойствами металла собственно кузовной панели.

Силы притяжения листовых металлов с индуцированными токами в соответствии с законом Ампера описываются зависимостью [4, 16]:

$$F_A(t, r) = \frac{\mu_0}{2} \cdot J_\varphi^2(t, r) \cdot \frac{r}{h}. \tag{3}$$

С помощью аналитических выражений, найденных в [15], приведём зависимость (3) к виду, удобному для вычислений.

После необходимых преобразований записываем, что

$$F_A(\varphi, r) = F_{Am}(\varphi) \cdot \left(\int_0^\infty \Phi_3(x) \cdot J_1\left(x \frac{r}{d}\right) \cdot dx \right)^2, \tag{4}$$

где $F_{Am}(\varphi) = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{r}{h} \left(j_m \cdot \frac{dj(\varphi)}{d\varphi} \cdot \frac{(\omega \cdot \tau)}{2} \right)^2$, $\Phi_3(x) = \frac{F(x) \cdot \left((1 - ch(x)) - \frac{1}{\mu_r} \cdot sh(x) \right)}{x^3 \left(sh(x) \cdot \left[sh\left(x \cdot \frac{h}{d}\right) + \frac{1}{\mu_r^2} ch\left(x \cdot \frac{h}{d}\right) \right] + \frac{1}{\mu_r} \cdot e^{x \cdot \frac{h}{d}} \cdot ch(x) \right)}$.

Сила притяжения, обусловленная магнитными свойствами металла кузовной панели, описывается зависимостью [4]:

$$F_M(\varphi, r) = -\frac{\mu_0}{2} (\mu_r - 1) \left(\mu_r \left[H_z^2(\zeta = 0) - H_z^2(\zeta = d) \right] + \left[H_r^2(\zeta = 0) - H_r^2(\zeta = d) \right] \right), \tag{5}$$

где $H_{z,r}(\zeta = 0), H_{z,r}(\zeta = d)$ – $\{z \text{ и } r\}$ – компоненты напряжённости магнитного поля на граничных поверхностях обрабатываемого листа.

С помощью соотношений (1) и (2) приведём зависимость (5) к виду, удобному для проведения вычислений:

$$F_M(\varphi, r) = -F_{Mm}(\varphi) \cdot \left(\mu_r \left[Y_1(r) - Y_2(r) \right] + \left[Y_3(r) - Y_4(r) \right] \right), \tag{6}$$

где $F_{Mm}(\varphi) = \frac{\mu_0}{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{\mu_r} \right) \cdot j_m^2 \cdot j^2(\varphi)$,

$$Y_1(r) = \left(\int_0^\infty \frac{F(x) \cdot \left(sh(x) + \frac{1}{\mu_r} \cdot ch(x) \right) \cdot J_0\left(x \cdot \frac{r}{d}\right)}{x \left(sh(x) \cdot \left[sh\left(x \cdot \frac{h}{d}\right) + \frac{1}{\mu_r^2} ch\left(x \cdot \frac{h}{d}\right) \right] + \frac{1}{\mu_r} \cdot e^{x \cdot \frac{h}{d}} \cdot ch(x) \right)} dx \right)^2,$$

$$Y_3(r) = \left(\int_0^{\infty} \frac{F(x) \cdot \left(ch(x) + \frac{1}{\mu_r} \cdot sh(x) \right) \cdot J_1 \left(x \cdot \frac{r}{d} \right)}{x \left(sh(x) \cdot \left[sh \left(x \cdot \frac{h}{d} \right) + \frac{1}{\mu_r^2} ch \left(x \cdot \frac{h}{d} \right) \right] + \frac{1}{\mu_r} \cdot e^{\frac{xh}{d}} \cdot ch(x)} \right)^2,$$

$$Y_4(r) = \left(\int_0^{\infty} \frac{F(x) \cdot J_1 \left(x \cdot \frac{r}{d} \right)}{x \left(sh(x) \cdot \left[sh \left(x \cdot \frac{h}{d} \right) + \frac{1}{\mu_r^2} ch \left(x \cdot \frac{h}{d} \right) \right] + \frac{1}{\mu_r} \cdot e^{\frac{xh}{d}} \cdot ch(x)} \right)^2.$$

Численные оценки. Как следует из физических соображений, в магнитных полях с напряжённостями, достаточными для ощутимого силового воздействия ($\sim 10^5 \div 10^7$ А/м), относительная магнитная проницаемость должна стремиться к величине, близкой к единице. Справедливость такого предположения обоснована авторами работы [1, 3–8]. Для определённости примем, что $\mu_r \approx 2,5$.

Для выяснения роли и влияния магнитных свойств экрана и заготовки на силовые характеристики рассматриваемой системы, вначале проведём расчёты для тех же условий: что были приняты в вычислениях с немагнитной сталью [15 – 17]: $R_1 = 0,025$ м, $R_2 = 0,035$ м, $h = 0,001$ м, $f = 1150$ Гц, $\delta = 0,2$, $J_m = 50$ кА, $d = 0,00075$ м, $\gamma = 0,4 \cdot 10^7$ 1/Ом·м.

Для вычисления нормальной и тангенциальной компонент сил Лоренца, воспользуемся аналитическими выражениями, полученными в работе [15, 17]

Результаты проведенных вычислений представлены на рис. 2–4.

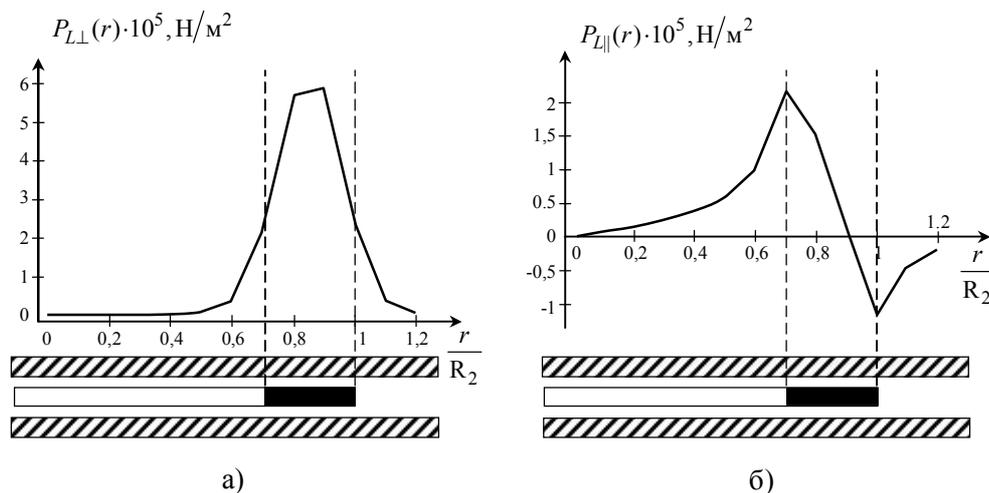


Рисунок 2 – Радиальные распределения временных амплитуд компонент сил Лоренца для магнитных металлов, $\mu_r = 2,5$, а) нормальная z – компонента, б) тангенциальная r – компонента

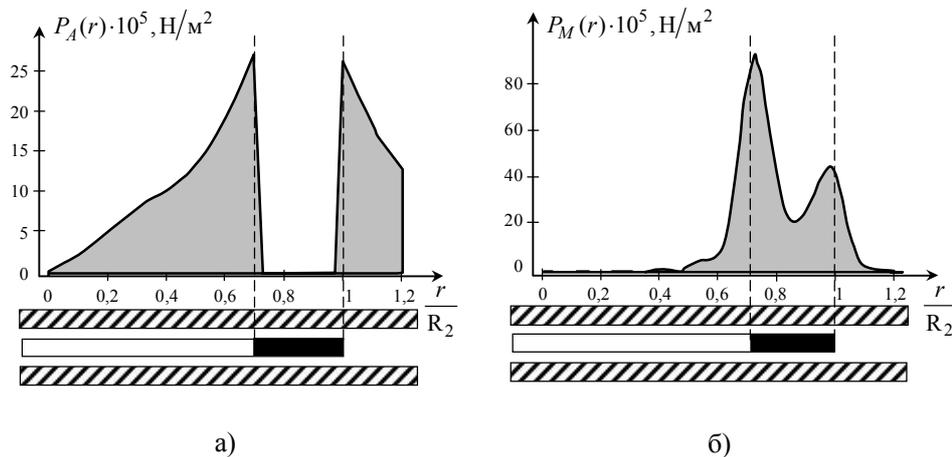


Рисунок 3 – Радиальные распределения временных амплитуд возбуждаемых сил притяжения для магнитных металлов, $\mu_r = 2, 5$: а) сила притяжения Ампера, б) сила магнитного притяжения

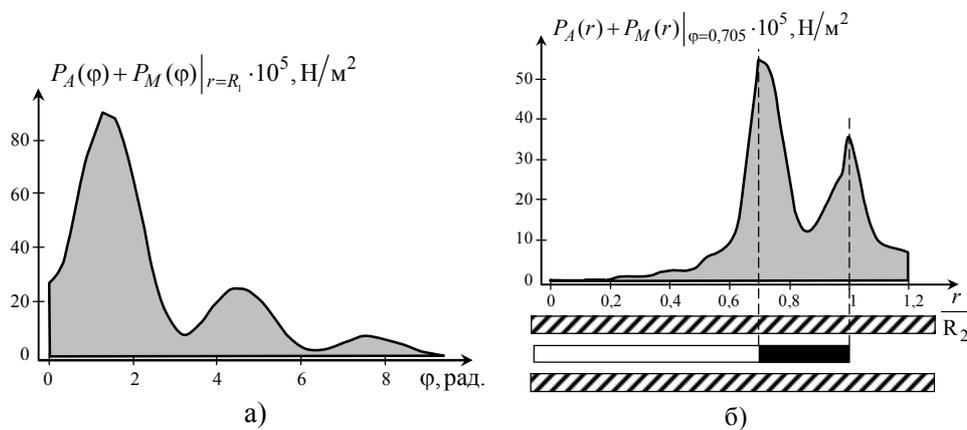


Рисунок 4 – Графические зависимости суммарной силы притяжения в системе с магнитными экраном и заготовкой, $\mu_r = 2, 5$: а) фазовая зависимость для $r = R_1$; б) радиальное распределение в момент $\phi = 0,705$ рад

Как было показано в работе [16] для немагнитных металлов, уменьшение ширины витка индуктора позволяет повысить силовые показатели рассматриваемой индукционной индукторной системы. Рассчитаем их в случае ферромагнитных экрана и кузовной панели для $R_1 = 0,03$ м, $R_2 = 0,035$ м.

Результаты вычислений приведены на рис. 5 и рис. 6.

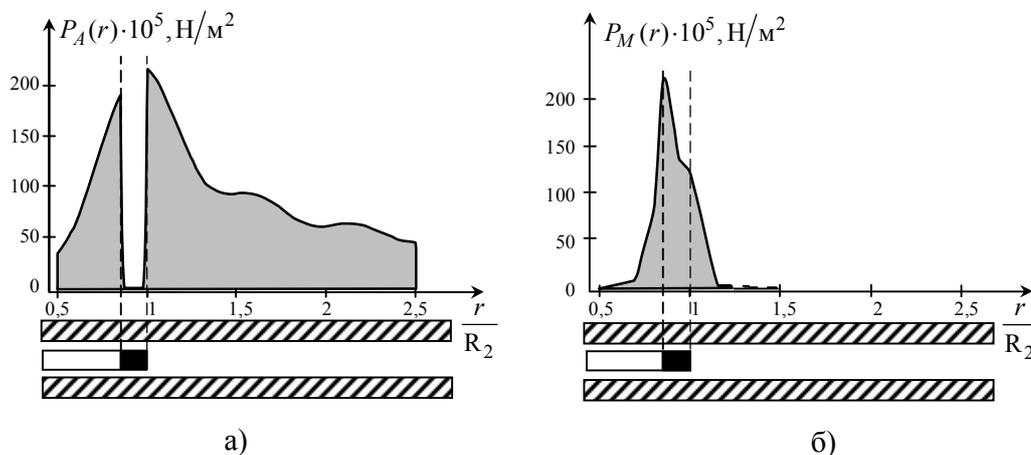


Рисунок 5 – Радиальные распределения временных амплитуд возбуждаемых сил притяжения для магнитных металлов ($\mu_r = 2, 5$) в случае тонкого витка ($R_1 = 0,03$ м, $R_2 = 0,035$ м): а) сила притяжения Ампера, б) сила магнитного притяжения

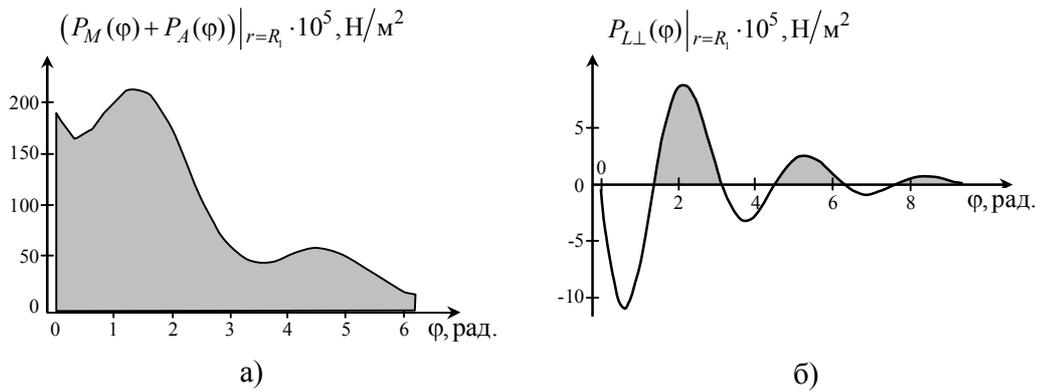


Рисунок 6 – Фазовые распределения возбуждаемых сил притяжения для магнитных металлов ($\mu_r = 2,5$) в случае тонкого витка ($R_1 = 0,03$ м, $R_2 = 0,035$ м): а) суммарная сила притяжения, б) сила Лоренца (вычисления для $r = R_1$)

Для иллюстративности помимо амплитудных значений следует привести усредненные силовые показатели. При расчёте последних, в качестве границ интервалов усреднения, примем значения радиальных координат, в пределах которых сосредоточены возбуждаемые силы. Подчеркнём, что оценка границ производится чисто визуально из графиков соответствующих распределений.

Так, среднее значение силы притяжения Ампера на интервале $\frac{r}{R_2} \in [0,5, 2,5]$ соответственно рис. 5а составляет 78 кГ/см^2 .

Усреднение силы магнитного притяжения на интервале $\frac{r}{R_2} \in [0,5, 1,2]$ согласно рис. 5б даёт в результате 98 кГ/см^2 .

Среднее значение суммарной силы притяжения (сила Ампера плюс сила магнитного притяжения) за время её действия составляет 110 кГ/см^2 .

Основные результаты проведенных вычислений сводятся к следующим положениям.

1. Влияние магнитных свойств экрана и металла кузовной панели проявляется в появлении мощных сил магнитного притяжения.

2. Даже при незначительном увеличении магнитной проницаемости металла экрана и кузовной панели автомобиля существенно растёт амплитуда сил Лоренца. Влиянием последней нельзя пренебрегать, её действие может исказить картину деформирования кузовной панели в области витка индуктора.

3. Все возбуждаемые силы имеют различные фазовые зависимости, вследствие чего их максимумы разнесены во времени, и суммарное действие возбуждаемых сил не определяется простым суммированием амплитудных значений.

4. Суперпозиция сил притяжения Ампера и сил магнитного притяжения в радиальных распределениях нивелирует провал силового действия на кузовную панель в области витка индуктора.

5. В целом, притяжение ферромагнетика в рассматриваемом универсальном инструменте оказывается существенно эффективнее, чем немагнитного металла, оценки для которого были проведены в работе [16]. Током индуктора с временной зависимостью в виде экспоненциально затухающей синусоиды с амплитудой 37 кА возбуждаются силы притяжения порядка $35 \dots 80 \text{ кГ/см}^2$.

Выводы

1. Проведен расчет и анализ электродинамических процессов в индукционной индукторной системе с идентичными ферромагнитными металлами кузовной панели и вспомогательного экрана – универсальном инструменте магнитно-импульсной рихтовки

автомобильных кузовов.

2. Получены аналитические выражения для вычисления сил притяжения Ампера и сил притяжения, обусловленных магнитными свойствами металла кузовной панели автомобиля.

3. Построены графические зависимости для возбуждаемых сил притяжения (усилия рихтовки) в рассматриваемом универсальном инструменте магнитно-импульсной рихтовки автомобильных кузовов.

4. Определено, что среднее значение силы притяжения Ампера составляет 78 кГ/см^2 , а силы притяжения, обусловленной магнитными свойствами металла кузовной панели автомобиля – 98 кГ/см^2 .

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гнатов А. В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Магнитно-импульсные технологии бесконтактной рихтовки кузовных элементов автомобиля : монография / А. В. Гнатов, Ю. В. Батыгин, Е. А. Чаплыгин. – Lap Lambert Academic Publishing, 2012 – 242 с.

2. Welcome to BETAG Innovation // Матеріали сайту – 2012. – Режим доступу : www.beulentechnik.com.

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

4. Гнатов А. В. Анализ электродинамических процессов в цилиндрических индукторных системах – инструментах магнитно-импульсной рихтовки : монография / А. В. Гнатов. – Харків : ХНАДУ, 2013 – 292 с.

5. Чаплыгин Е. А. Разработка цилиндрических индукционных индукторных систем для магнитно-импульсного притяжения тонких металлических листов: дисс. ... кандидата техн. наук : 05.09.13 / Чаплыгин Евгений Александрович. – Харьков, 2009. – 169 с.

6. Батыгин Ю. В. Эксперименты с индукционными индукторными системами для магнитно-импульсного притяжения листовых металлов / Ю. В. Батыгин, Е. А. Чаплыгин, Т. Т. Черногор // Електротехніка і електромеханіка. – Харків, 2008. – № 6. – С. 64-67.

7. Батыгин Ю. В. Электродинамические процессы в цилиндрической индукционной индукторной системе для магнитно – импульсного притяжения листовых заготовок / Ю. В. Батыгин, А. Ю. Бондаренко, Е. А. Чаплыгин // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2007. – № 11/47. – С. 109-117 .

8. Батыгин Ю. В. Электродинамические процессы в индукционной индукторной системе с прямоугольной формой рабочей зоны / Ю. В. Батыгин, А. Ю. Бондаренко, Г. С. Сериков // Авиационно-космическая техника и технология, 2008. – № 2 (49). – С. 45-50.

9. Пат. 70055 України, В21 Д 26/14. Спосіб магнітно-імпульсної притягання металевих об'єктів одновитковою індукторною системою з тонким екраном / Батигін Ю. В., Гнатов А. В., Чаплигін Є. О., Аргун І. В., Гопко А. В., Дробінін О. М.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u 2011 13398 заявл. 14.11.2011; опубл. 25.05.2012, Бюл. № 10.

10. Пат. 70734 України, В21 Д 26/14. Спосіб магнітно-імпульсного притягання металевих об'єктів двовитковою круговою індукторною системою з тонким екраном / Батигін Ю. В., Гнатов А. В., Чаплигін Є. О., Гопко А. В., Щиголева С. О., Дробінін О. М.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u2011 14018 заявл. 28.11.2011; опубл. 25.06.2012, Бюл. № 12.

11. Электромагнитные процессы в симметричных индукционных системах с идентичными ферромагнитными тонкостенными экраном и листовой заготовкой /

Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, Щ. В. Аргун [и др.] // *Электротехника і електромеханіка*. – Харків : НТУ «ХП», 2012. – № 4 – С. 50-53.

12. Пат. 74736 України, В21 Д 26/14. Спосіб магнітно-імпульсного притягання металевих об'єктів заготовок одновитковим прямокутним індуктором, що складається з двох паралельних гілок та розташований над допоміжним екраном / Батигін Ю. В., Гнатов А. В., Щиголева С. О., Чаплигін Є. О., Гопко А. В., Дробінін О. М.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u2012 04717 заявл. 17.04.2012; опубл. 12.11.2012, Бюл. № 21.

13. Пат. 76606 України, В21 Д 26/14. Спосіб магнітно-імпульсного притягання металевих об'єктів одновитковим циліндричним індуктором, розділеним на дві гілки / Батигін Ю. В., Гнатов А. В., Чаплигін Є. О.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u2012 07547 заявл. 20.06.2012; опубл. 10.01.2013, Бюл. № 1.

14. Пат. 77579 України, В21 Д 26/14. Спосіб магнітно-імпульсного притягання металевих заготовок одновитковим круговим індуктором, розташованим над допоміжним екраном / Батигін Ю. В., Гнатов А. В., Чаплигін Є. О., Трунова І С., Гопко А. В., Сабокар О. С.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u 2012 07542 заявл. 22.06.2012; опубл. 25.02.2013, Бюл. № 4.

15. Батыгин Ю. В. Силы Лоренца в индукционной индукторной системе техники МИОМ / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, С. А. Шиндерук // *Научно-теоретический журнал «Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова»*. – Белгород, 2014. – № 2. – С. 170–175.

16. Батыгин Ю. В. Расчет электродинамических процессов в индукционной индукторной системе с немагнитными металлами / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, С. А. Шиндерук // *Научно-теоретический журнал «Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова»*. – Белгород.– 2014. – № 3. – С. 169–174.

17. Гнатов А.В. Научные основы восстановления кузовных панелей автомобилей методами внешней бесконтактной рихтовки: дисс. ... доктора техн. наук : 05.22.20 / Гнатов Андрей Викторович. – Харьков, 2014. – 391 с.

REFERENCES

1. Gnatov A. V. Impuljsnihe magnitnihe polya dlya progressivnihkh tekhnologiy. Magnitno-impuljsnihe tekhnologii beskontaktoyj rikhtovki kuzovnihkh ehlementov avtomobilya : monografiya / A. V. Gnatov, Yu. V. Batihgin, E. A. Chaplihgin. – Lap Lambert Academic Publishing, 2012 – 242 s.

2. Welcome to BETAG Innovation // *Materiali sayjtu – 2012*. – Rezhim dostupu : www.beulentechnik.com.

3. Turenko A. N. Impuljsnihe magnitnihe polya dlya progressivnihkh tekhnologiy. Tom 3. Teoriya i ehksperiment prityazheniya tonkostennihkh metallov impuljsnihmi magnitnihmi polyami : monografiya / A. N. Turenko, Yu. V. Batihgin, A. V. Gnatov. – Kharkiv : KhNADU, 2009 – 240 s.

4. Gnatov A. V. Analiz ehlektrodinamicheskikh processov v cilindricheskikh induktornihkh sistemakh – instrumentakh magnitno-impuljsnoyj rikhtovki : monografiya / A. V. Gnatov. – Kharkiv : KhNADU, 2013 – 292 s.

5. Chaplihgin E. A. Razrabotka cilindricheskikh indukcionnihkh induktornihkh sistem dlya magnitno-impuljsnogo prityazheniya tonkikh metallicheskih listov: diss. ... kandidata tekhn. nauk : 05.09.13 / Chaplihgin Evgeniy Aleksandrovich. – Kharjkov, 2009. – 169 s.

6. Batihgin Yu. V. Ehksperimentih s indukcionnihmi induktornihmi sistemami dlya magnitno-impuljsnogo prityazheniya listovihkh metallov / Yu. V. Batihgin, E. A. Chaplihgin, T. T. Chernogor // *Elektrotehnika i elektromekhanika*. – Kharkiv, 2008. – № 6. – S. 64-67.

7. Batihgin Yu. V. Ehlektrodinamicheskie processih v cilindricheskoyj indukcionnoyj induktornoyj sisteme dlya magnitno – impuljsnogo prityazheniya listovihkh zagotovok / Yu. V. Batihgin, A. Yu. Bondarenko, E. A. Chaplihgin // *Aviaciyjno-kosmichna tekhnika i tekhnologiya*. – 2007. – № 11/47. – S. 109-117.

8. Batihgin Yu. V. Ehlektrodinamicheskie processih v indukcionnoy indukcionnoy sisteme s pryamougol'noy formoy rabochey zonih / Yu. V. Batihgin, A. Yu. Bondarenko, G. S. Serikov // Aviaciono-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya, 2008. – № 2 (49). – S. 45-50.

9. Pat. 70055 Ukraïni, V21 D 26/14. Sposib magnitno-impul'snoi prityagannya metalevikh ob'ektiv odnovitkovoyu indukcionnoy sistemoju z tonkim ekranom / Batigin Yu. V., Gnatov A. V., Chapligin Є. O., Argun Th. V., Gopko A. V., Drobinin O. M; zayavnik ta patentovlasnik Kharkivskij nac. avtom.-dorozhn. un-t. – № u 2011 13398 zayavl. 14.11.2011; opubl. 25.05.2012, Byul. № 10.

10. Pat. 70734 Ukraïni, V21 D 26/14. Sposib magnitno-impul'snogo prityagannya metalevikh ob'ektiv dvovitkovoyu krugovoyu indukcionnoy sistemoju z tonkim ekranom / Batigin Yu. V., Gnatov A. V., Chapligin Є. O., Gopko A. V., Thigoleva S. O., Drobinin O. M; zayavnik ta patentovlasnik Kharkivskij nac. avtom.-dorozhn. un-t. – № u2011 14018 zayavl. 28.11.2011; opubl. 25.06.2012, Byul. № 12.

11. Ehlektromagnitnihe processih v simmetrichnikh indukcionnikh sistemakh s identichnihmi ferromagnitnihmi tonkostennihmi ehkranom i listovoyj zagotivkoj / Yu. V. Batihgin, A. V. Gnatov, Th. V. Argun [i dr.] // Elektrotehnika i elektromekhanika. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2012. – № 4 – S. 50-53.

12. Pat. 74736 Ukraïni, V21 D 26/14. Sposib magnitno-impul'snogo prityagannya metalevikh ob'ektiv zagotivok odnovitkovim pryamokutnim induktorom, tho skladaetsya z dvokh paralelnikh gilok ta roztashovaniy nad dopomizhnim ekranom / Batigin Yu. V., Gnatov A. V., Thigoleva S. O., Chapligin Є. O., Gopko A.V., Drobinin O. M.; zayavnik ta patentovlasnik Kharkivskij nac. avtom.-dorozhn. un-t. – № u2012 04717 zayavl. 17.04.2012; opubl. 12.11.2012, Byul. № 21.

13. Pat. 76606 Ukraïni, V21 D 26/14. Sposib magnitno-impul'snogo prityagannya metalevikh ob'ektiv odnovitkovim cilindrichnim induktorom, rozdilenim na dvi gilki / Batigin Yu. V., Gnatov A. V., Chapligin Є. O. ; zayavnik ta patentovlasnik Kharkivskij nac. avtom.-dorozhn. un-t. – № u2012 07547 zayavl. 20.06.2012; opubl. 10.01.2013, Byul. № 1.

14. Pat. 77579 Ukraïni, V21 D 26/14. Sposib magnitno-impul'snogo prityagannya metalevikh zagotivok odnovitkovim krugovim induktorom, roztashovanim nad dopomizhnim ekranom / Batigin Yu. V., Gnatov A. V., Chapligin Є. O., Trunova I S., Gopko A. V., Sabokar O. S. ; zayavnik ta patentovlasnik Kharkivskij nac. avtom.-dorozhn. un-t. – № u 2012 07542 zayavl. 22.06.2012; opubl. 25.02.2013, Byul. № 4.

15. Batihgin Yu. V. Silih Lorenci v indukcionnoy indukcionnoy sisteme tekhniki MIOM / Yu. V. Batihgin, A. V. Gnatov, S. A. Shinderuk // Nauchno-teoreticheskij zhurnal «Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova». – Belgorod, 2014. – № 2. – S. 170–175.

16. Batihgin Yu. V. Raschet ehlektrodinamicheskikh processov v indukcionnoy indukcionnoy sisteme s nemagnitnihmi metallami / Yu. V. Batihgin, A. V. Gnatov, S. A. Shinderuk // Nauchno-teoreticheskij zhurnal «Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova». – Belgorod. – 2014. – № 3. – S. 169–174.

17. Gnatov A.V. Nauchnihe osnovih vosstanovleniya kuzovnikh panelej avtomobilej metodami vneshnej beskontaktnoy rikhtovki: diss. ... doktora tekhn. nauk : 05.22.20 / Gnatov Andrey Viktorovich. – Khar'kov, 2014. – 391 s.

Гнатів А.В. СИЛИ ПРИТЯГАННЯ В УНІВЕРСАЛЬНОМУ ІНСТРУМЕНТІ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОГО РИХТУВАННЯ

Останнім часом, все більш високим попитом користуються операції по ремонту та відновленню кузовних панелей автомобілів. Особливий інтерес представляють пристрої, що дозволяють здійснити зовнішнє рихтування без розбирання кузова автомобіля і порушення існуючого захисного покриття. До таких інструментів відносяться індукційні індукторні системи – універсальні інструменти зовнішньої безконтактної магнітно-імпульсної рихтування. Принцип дії даних індукторних систем заснований на законі Ампера, за яким провідники з колінеарними однаково спрямованими струмами притягуються один до одного. Одним з найбільш важливих питань при

виборі певної конструкції таких індукторних систем є дослідження в них електродинамічних процесів з визначенням збуджуваних зусиль. Їх характер протікання відповідно до конструктивних особливостей визначає ефективність і працездатність індукційних індукторних систем, як універсального інструменту зовнішньої безконтактної магнітно-імпульсної рихтування. У роботі проведено аналіз електродинамічних процесів в індукційній індукторній системі з ідентичними ферромагнітними металами оброблюваної заготовки і допоміжного екрана. Отримано аналітичні вирази для розрахунку сил притягання Ампера і сил притягання, обумовлених магнітними властивостями оброблюваного металу. Отримані результати проілюстровані чисельними оцінками для реальних ситуацій в практиці зовнішньої безконтактної магнітно-імпульсної рихтування.

Ключові слова: зовнішнє рихтування, видалення вм'ятин, кузовний ремонт, магнітно-імпульсна обробка металів, кузовна панель.

Hnatov A.V. ATTRACTIVE FORCES IN THE UNIVERSAL TOOL MAGNETIC PULSE STRAIGHTENING

Recently, more and more high-demand operations to repair and restore the body panels of cars. Of particular interest are devices to hold, without disassembling the external alignment of the car body and the violation of the existing protective coating. Such tools include induction inductor system - the universal tool of external contactless magnetic pulse alignment. The operating principle of these systems is based on the inductor Ampere's law, according to which the conductors with collinear currents in the same direction attract each other. One of the most important issues when choosing a particular design inductor such systems is the study of electrodynamic processes in them with the determination of excited effort. Their character of course in accordance with the structural features determine the effectiveness and efficiency of induction inductor systems as a universal instrument of foreign non-contact magnetic pulse alignment. The analysis of electrodynamic processes in the induction inductor system with identical ferromagnetic metal workpiece and the sub screen. The analytical expressions for the calculation of the forces of attraction and Ampère forces of attraction due to the magnetic properties of the treated metal. The results obtained are illustrated by numerical estimates for the real situations in the practice of external contactless magnetic pulse alignment.

Keywords: external straightening, removing dents, body repair, magnetic-pulse metal working, car body panels.

© Гнатів А.В.

Статтю прийнято
до редакції 19.11.15