

УДК 621.318

ИНСТРУМЕНТ РИХТОВКИ «ИНДУКТОРНАЯ СИСТЕМА С ПРИТЯГИВАЮЩИМ ЭКРАНОМ» И ПРОТЯЖЕННЫМ СОЛЕНОИДОМ

Ю.В. Батыгин, проф., д.т.н., Е.А. Чаплыгин, доц., к.т.н.,
М.В. Барбашова, доц., к.т.н., О.Е. Гаврилова, студ.,
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. Проведен анализ электродинамических процессов в «индукторной системе с притягивающим экраном», которая представлена цилиндрическим многовитковым соленоидом на торце с различными листовыми металлами. Показано, что для уменьшения размера рабочей зоны, для неизменности распределённых сил притяжения, требуется увеличение тока в индукторе.

Ключевые слова: индукторная система, цилиндрический многовитковый соленоид, притягивающий экран.

ИНСТРУМЕНТ РИХТУВАННЯ «ИНДУКТОРНА СИСТЕМА ІЗ ПРИТЯГУЮЧИМ ЕКРАНОМ» ТА ПРОТЯЖНИМ СОЛЕНОЇДОМ

Ю.В. Батигін, проф., д.т.н., Є.О. Чаплигін, доц., к.т.н.,
М.В. Барбашова, доц., к.т.н., О.Є. Гаврилова, студ.,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Проведено аналіз електродинамічних процесів в «індукторній системі з притягуючим екраном», поданий циліндричним багатовитковим соленоїдом на торці з різними листовими металами. Показано, що для зменшення розміру робочої зони, задля незмінності розподіленних сил притягання, потрібне збільшення струму в індукторі.

Ключові слова: індукторна система, циліндричний багатовитковий соленоїд, притягуючий екран.

STRAIGHTENING TOOL «INDUCTOR SYSTEM WITH AN ATTRACTING SCREEN» AND LENGTHY SOLENOID

Yu. Batyhin, Prof., D. Sc. (Eng.), Ye. Chaplyhin, Assoc. Prof., Ph. D. (Eng.),
M. Barbashova, Assoc. Prof., Ph. D. (Eng.), O. Gavrilova, St.,
Kharkov National Automobile and Highway University

Abstract. The article presents the analysis of electrodynamic processes in the «inductor system with an attracting screen». Its design is presented by a cylindrical multi-turn solenoid at the end of which various thin-walled sheet metals are attached. Estimates of excitation efficiency of electrodynamic attracting forces are presented. The adequacy of Physics and mathematical model is provided by taking into account the inductor geometry, its location and diffusion effects.

Key words: inductor system, cylindrical multi-turn solenoid, attracting screen.

Введение

Интерес к конструктивному исполнению источника поля в виде протяжённого цилиндрического соленоида [1] обусловлен практикой создания эффективных инструментов магнитно-импульсного притяжения. Безусловно, ранее рассмотренный вариант воз-

дрического соленоида [1] обусловлен практикой создания эффективных инструментов магнитно-импульсного притяжения. Безусловно, ранее рассмотренный вариант воз-

буждения системы плоским круговым соленоидом [2, 3] обеспечивает максимум электромагнитной связи между его обмоткой и листовыми металлами. Существенным недостатком такой конструкции источника поля является обширность рабочей зоны и, соответственно, невозможность концентрации силового воздействия на малых участках поверхности объектов обработки.

В конструкции инструмента магнитно-импульсного притяжения, где поле возбуждается протяжённым цилиндрическим соленоидом, имеет место более низкий уровень электромагнитной связи между его обмоткой и листовыми металлами. Но этот недостаток компенсируется тем, что при достаточно малом диаметре соленоида становится возможным сконцентрировать силы притяжения на небольших площадях обрабатываемой заготовки.

Анализ публикаций

Магнитно-импульсная рихтовка – область обрабатывающих технологий, которая в последнее время все больше набирает популярности [4]. Данный вид металлообработки основан на естественном притяжении тонкостенных листов низкочастотными магнитными полями, которое было экспериментально обнаружено профессорами Ю.В. Батыгиным, В.И. Лавинским, Л.Т. Хименко в 2004 г. и впервые описано в авторских публикациях [5, 6]. На его базе разрабатываются рабочие инструменты для выполнения производственных операций не только по устранению вмятин в поврежденных металлических покрытиях транспортных средств [7–9], но и технологий комбинированного плана, осуществляющих магнитно-импульсную формовку изделий, как отталкиванием, так и притяжением заданных участков обрабатываемого объекта [8, 10].

Цель и постановка задачи

Целью работы является проведение анализа и оценка эффективности возбуждения электродинамических сил притяжения с помощью специальной физико-математической модели.

Постановка задачи – расчетная модель в цилиндрической системе координат – представлена на рис. 1.

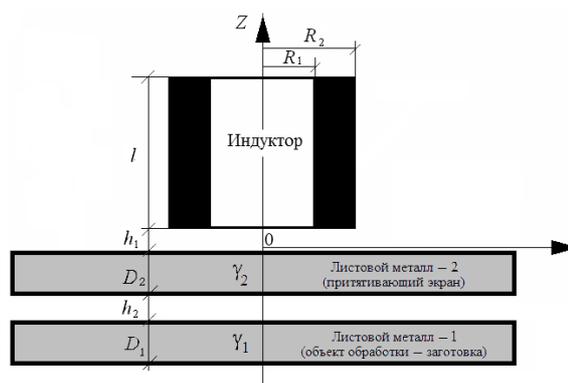


Рис. 1. Модель индукторной системы с длинным цилиндрическим соленоидом – индуктором, на торце которого расположены тонкостенные листовые металлы

Для решения задачи примем следующие допущения:

- достаточно протяжённые в поперечных измерениях листовая заготовка и тонкостенный экран выполнены из немагнитных металлов с удельными электропроводностями – γ_1, γ_2 и толщинами – D_1, D_2 соответственно;
- система обладает азимутальной симметрией, так что $\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$; φ – азимутальный угол;
- ток в обмотке индуктора представлен азимутальной компонентой с равномерно распределённой пространственной плотностью – $j_\varphi(t)$, t – время;
- электромагнитные процессы в системе квазистационарны по Ландау, так что $\frac{\omega}{c} \cdot L \gg 1$, ω – циклическая частота, c – скорость света в вакууме, L – наибольший характерный размер системы;
- витки обмотки выполнены из проводников с поперечным сечением $\sim d \times d$ в изоляции толщиной – Δ ;
- металл обмотки индуктора «прозрачен» для действующих полей и не влияет на протекающие электромагнитные процессы.

Материалы и результаты исследований

Решение поставленной задачи проведём аналогично авторским работам [11, 12].

Уравнения Максвелла для нетривиальных составляющих напряжённости электромагнитного поля, преобразованных по Лапласу с учётом нулевых начальных условий, в пространстве над листовой заготовкой, где $z \geq 0$, имеют вид

$$\begin{cases} \frac{\partial H_r(p, r, z)}{\partial z} - \frac{\partial H_z(p, r, z)}{\partial r} = j_\varphi(p, r, z); & (1) \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi(p, r, z)) = -\mu_0 \cdot p \cdot H_z(p, r, z); & (2) \\ \frac{\partial E_\varphi(p, r, z)}{\partial z} = \mu_0 \cdot p \cdot H_r(p, r, z), & (3) \end{cases}$$

где p – параметр преобразования Лапласа;

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

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

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

Согласно модели на рис. 1 выделим области с одинаковыми электрофизическими характеристиками: 1) область 1, свободное полупространство под листовым металлом – 1, $z \in (-\infty; -D_1]$; 2) область 2, полоса собственно листового металла – 1, $z \in [-D_1; -(h_2 + D_2)]$; 3) область 3, полоса промежутка между плоскостями листовых металлов, $z \in [-(h_2 + D_2); -D_2]$; 4) область 4, полоса собственно листового металла – 2, $z \in [-D_2; 0]$; 5) область 5, полупространство над поверхностью листового металла – 2 со стороны индуктора, $z \in [0; \infty)$. В каждой из выделенных областей из системы (1)–(3) следует получить дифференциальные уравнения для φ – компоненты вектора напряжённости электрического поля – $E_\varphi(p, r, z)$.

Азимутальная симметрия принятой модели, а также требование ограниченности возбуждаемых полей при $r = 0$ и $r \rightarrow \infty$ позволяют применить преобразование Фурье-Бесселя, в соответствии с которым имеют место следующие интегральные представления для напряжённости и возбуждающего тока

$$\begin{cases} E_\varphi(p, \lambda, z) = \int_0^\infty E_\varphi(p, r, z) \cdot J_1(\lambda) r dr; & (4) \\ j_\varphi(p, \lambda, z) = j(p) \cdot f_1(\lambda) \cdot f_2(z), \end{cases}$$

где λ – параметр интегрального преобразования; $J_1(\lambda r)$ – функция Бесселя первого порядка

$$f_1(\lambda) = \int_{R_1}^{R_2} r \cdot J_1(\lambda r) dr.$$

Интегралы линейных дифференциальных уравнений 2-го порядка с постоянными коэффициентами определяются следующими зависимостями:

1) область 1, свободное полупространство под листовым металлом, $z \in (-\infty; -D_1]$,

$$E_\varphi^{(1)}(p, \lambda, z) = A_1(p, \lambda) \cdot e^{\lambda z} + A_2(p, \lambda) \cdot e^{-\lambda z}, \quad (5)$$

где $A_{1,2}(p, \lambda)$ – произвольные постоянные интегрирования;

2) область 2 (полоса собственно листового металла – 1), $z \in [-D_1; -(h_2 + D_2)]$,

$$\begin{aligned} E_\varphi^{(2)}(p, \lambda, z) = & B_1(p, \lambda) \cdot e^{q_1(p, \lambda)z} + \\ & + B_2(p, \lambda) \cdot e^{-q_1(p, \lambda)z}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $B_{1,2}(p, \lambda)$ – произвольные постоянные интегрирования;

3) область 3, полоса промежутка между плоскостями листовых металлов, $z \in [-(h_2 + D_2); -D_2]$,

$$E_\varphi^{(3)}(p, \lambda, z) = C_1(p, \lambda) \cdot e^{\lambda z} + C_2(p, \lambda) \cdot e^{-\lambda z}, \quad (7)$$

где $C_{1,2}(p, \lambda)$ – произвольные постоянные интегрирования;

4) область 4, полоса собственно листового металла – 2, $z \in [-D_2; 0]$,

$$\begin{aligned} E_\varphi^{(4)}(p, \lambda, z) = & G_1(p, \lambda) \cdot e^{q_1(p, \lambda)z} + \\ & + G_2(p, \lambda) \cdot e^{-q_1(p, \lambda)z}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $G_{1,2}(p, \lambda)$ – произвольные постоянные интегрирования;

5) область 5, полупространство над поверхностью листового металла – 2 со стороны индуктора, $z \in [0; \infty)$,

$$\begin{aligned} E_\varphi^{(5)}(p, \lambda, z) = & L_1(p, \lambda) e^{\lambda z} + L_2(p, \lambda) e^{-\lambda z} - \\ & - \frac{K(p, \lambda)}{\lambda^2} \left[\left(1 - \text{ch}(\lambda(z - h_1)) \right) \eta(z - h_1) - \right. \\ & \left. \left(1 - \text{ch}(\lambda(z - (h_1 + \ell))) \right) \eta(z - (h_1 + \ell)) \right], \end{aligned} \quad (9)$$

где $L_{1,2}(p, \lambda)$ – произвольные постоянные интегрирования.

Из условия непрерывности тангенциальных компонент вектора напряжённости электромагнитного поля на границах выделенных областей можно получить систему линейных алгебраических уравнений в выражениях, полученных ранее в [11], относительно неизвестных произвольных постоянных для $E_{\varphi}^{(1-5)}(p, \lambda, z)$ и $H_r^{(1-5)}(p, \lambda, z)$.

$$\begin{cases} z = 0 \\ \left[-\frac{K(p, \lambda)}{2\lambda^2} \cdot e^{-\lambda h_1} \cdot (1 - e^{-\lambda \ell}) \right] + L_2(p, \lambda) = \\ = G_1(p, \lambda) + G_2(p, \lambda), \\ \frac{\lambda}{p \cdot \mu_0} \cdot \left(\left[-\frac{K(p, \lambda)}{2\lambda^2} e^{-\lambda h_1} (1 - e^{-\lambda \ell}) \right] - L_2(p, \lambda) \right) = \\ = \frac{q_2(p, \lambda)}{p \cdot \mu_0} \cdot (G_1(p, \lambda) - G_2(p, \lambda)); \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} z = -D_2 \\ \left\{ \begin{aligned} G_1(p, \lambda) \cdot e^{-q_2(p, \lambda) \cdot D_2} + G_2(p, \lambda) \cdot e^{q_2(p, \lambda) \cdot D_2} = \\ = C_1 e^{-\lambda \cdot D_2} + C_2 e^{\lambda \cdot D_2}, \\ \frac{q_2(p, \lambda)}{p \cdot \mu_0} (G_1(p, \lambda) e^{-q_2(p, \lambda) \cdot D_2} - G_2(p, \lambda) e^{q_2(p, \lambda) \cdot D_2}) = \\ = \frac{\lambda}{p \cdot \mu_0} (C_1 e^{-\lambda \cdot D_2} - C_2 e^{\lambda \cdot D_2}); \end{aligned} \right. \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} z = -(D_1 + h_2) \\ \left\{ \begin{aligned} B_1(p, \lambda) \cdot e^{-q_1(p, \lambda)(D_1 + h_2)} + B_2(p, \lambda) \times \\ \times e^{q_1(p, \lambda)(D_1 + h_2)} = C_1 e^{-\lambda(D_1 + h_2)} + C_2 e^{\lambda(D_1 + h_2)}, \\ \frac{q_1(p, \lambda)}{p \cdot \mu_0} (B_1(p, \lambda) e^{-q_1(p, \lambda)(D_1 + h_2)} - \\ - B_2(p, \lambda) e^{q_1(p, \lambda)(D_1 + h_2)}) = \\ = \frac{\lambda}{p \cdot \mu_0} (C_1 e^{-\lambda(D_1 + h_2)} - C_2 e^{\lambda(D_1 + h_2)}); \end{aligned} \right. \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} z = -(D_1 + D_2 + h_2) \\ \left\{ \begin{aligned} B_1(p, \lambda) e^{-q_1(p, \lambda)(D_1 + D_2 + h_2)} + B_2(p, \lambda) \times \\ \times e^{q_1(p, \lambda)(D_1 + D_2 + h_2)} = A_1 e^{-\lambda(D_1 + D_2 + h_2)}, \\ \frac{q_1(p, \lambda)}{p \mu_0} (B_1(p, \lambda) e^{-q_1(p, \lambda)(D_1 + D_2 + h_2)} - \\ - B_2(p, \lambda) e^{q_1(p, \lambda)(D_1 + D_2 + h_2)}) = \frac{\lambda}{p \mu_0} A_1 e^{-\lambda(D_1 + D_2 + h_2)}. \end{aligned} \right. \end{cases} \quad (13)$$

Низкочастотный режим, расчётные соотношения

Наибольший практический интерес представляет случай, когда листовые экран и заготовка достаточно тонкостенны и «прозрачны» для действующих полей (низкочастотный режим: $\omega \cdot \tau_{1,2} \ll 1$; $\tau_{1,2} = \mu_0 \cdot \gamma_{1,2} \cdot D_{1,2}^2$, [8]). Формально эта идеализация соответствует соотношениям: $|p \cdot \mu_0 \cdot \gamma_{1,2}| \ll \lambda^2$ и $q_{1,2}(p, \lambda) \approx \lambda$.

Далее для определения индуцированных токов нам понадобятся только $B_{1,2}(p, \lambda)$ и $G_{1,2}(p, \lambda)$. В принятой идеализации достаточно низких частот протекающих процессов найдём их из систем (10)–(13).

Выполнив тождественные преобразования, получаем, что

$$\begin{aligned} B_1(p, \lambda) = G_1(p, \lambda) = -\frac{K(p, \lambda)}{2\lambda^2} \cdot e^{-\lambda h_1} \times \\ \times (1 - e^{-\lambda \ell}), B_2(p, \lambda) = G_2(p, \lambda) = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Выражение для линейной плотности тока в металле экрана имеет вид

$$\begin{aligned} J_{s-m}(r) = -\left(\frac{I_m}{N_m} \cdot d \right) \left(\frac{\omega \tau_2}{2D_2^2} \right) \int_0^\infty \frac{f_1(x)}{x^2} e^{-x \frac{h_1}{d}} \times \\ \times \left(1 - e^{-x \frac{\ell}{d}} \right) \left(1 - e^{-x \frac{D_2}{d}} \right) J_1 \left(x \frac{r}{d} \right) dx, \end{aligned} \quad (15)$$

где $f_1(x) = \frac{1}{x^2} \cdot \int_{\left(x \frac{R_1}{d}\right)}^{\left(x \frac{R_2}{d}\right)} y \cdot J_1(y) dy$.

Линейная плотность тока в металле заготовки

$$\begin{aligned} J_{w-m}(r) = -\left(\frac{I_m}{N_m} \cdot d \right) \left(\frac{\omega \tau_1}{2D_1^2} \right) \int_0^\infty \frac{f_1(x)}{x^2} e^{-x \frac{(h_1 + D_2 + h_2)}{d}} \times \\ \times \left(1 - e^{-x \frac{\ell}{d}} \right) \left(1 - e^{-x \frac{D_1}{d}} \right) \cdot J_1 \left(x \frac{r}{d} \right) dx. \end{aligned} \quad (16)$$

Ток, индуцированный в круге радиуса – R на поверхности экрана,

$$I_{s-m}(R) = -\frac{I_m}{N_m} \left(\frac{\omega \tau_2}{2} \right) \left(\frac{d}{D_2} \right)^2 \int_0^{\infty} \frac{f_1(x)}{x^3} e^{-x \frac{h_1}{d}} \times \\ \times \left(1 - e^{-x \frac{\ell}{d}} \right) \left(1 - e^{-x \frac{D_2}{d}} \right) \cdot \left(1 - J_0 \left(x \frac{R}{d} \right) \right) dx. \quad (17)$$

Ток, индуцированный в круге радиуса – R на поверхности заготовки

$$I_{w-m}(R) = -\frac{I_m}{N_m} \left(\frac{\omega \tau_1}{2} \right) \left(\frac{d}{D_1} \right)^2 \int_0^{\infty} \frac{f_1(x)}{x^3} e^{-x \frac{(h_1 + D_2 + h_2)}{d}} \times \\ \times \left(1 - e^{-x \frac{\ell}{d}} \right) \left(1 - e^{-x \frac{D_1}{d}} \right) \left(1 - J_0 \left(x \frac{R}{d} \right) \right) dx. \quad (18)$$

Распределённые силы притяжения

$$P_{attr-m}(r) = \mu_0 \cdot J_{s-m}(r) \cdot J_{w-m}(r) \cdot \left(\frac{r}{h_2} \right), \quad (19)$$

где $J_{s-m}(r)$, $J_{w-m}(r)$ – определены зависимостями (15) и (16) соответственно.

Численные оценки токов и сил

При проведении численных оценок примем исходные данные, соответствующие параметрам реальных индукторных систем (обозначения соответствуют схеме на рис. 1):

$d = 0,003$ м, $\Delta = 0,001$ м, $h_1 = 0,0005$ м, $D_{2,1} = 0,001$ м, $h_2 = 0,002$ м, $R_1 = 0,01$ м, $w_{r,z} = 1-30$, рабочая частота тока в индукторе – $f = 1000$ Гц, амплитуда возбуждающего тока ~ 10 кА.

Общее число витков в обмотке соленоида, вне зависимости от конструктивного расположения витков, составляет – $w_g = w_r \cdot w_l = 30$.

Оценка эффективности развиваемых сил притяжения производится по следующим показателям:

– среднее значение распределённой силы притяжения на интервале $r \in [0; R_w]$, где R_w – внешний радиус рабочей зоны, вычисляется как среднее значение непрерывной функции

$$-\bar{P}_{attr} = \frac{1}{R_w} \cdot \int_0^{R_w} P_{attr}(r) dr;$$

– интегральная сила притяжения на площади с $r \in [0; R_w]$ вычисляется как интеграл вида

$$F_{attr}^{full} = 2\pi \int_0^{R_w} P_{attr}(r) r dr;$$

– сила притяжения на площади с $r \in [r_1; r_2]$, $r_{1,2}$ – внутренний и внешний радиусы области, где сконцентрировано $\sim 90\%$ возбуждаемой интегральной силы, вычисляется как интеграл – $F_{attr}^{90\%} = 2\pi \int_{r_1}^{r_2} P_{attr}(r) r dr$,

так называемый 90 %-й показатель $\left(\frac{F_{attr}^{90\%}}{F_{attr}^{full}} \approx 0,9 \right)$.

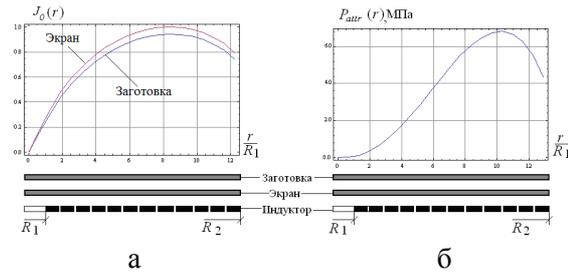


Рис. 2. Радиальные распределения токов и сил в ИСПЭ, возбуждаемой внешним соленоидом с однослойной обмоткой ($w_r=1$), число витков по радиусу – $w_r=30$: а – индуцированные токи в относительных величинах; б – распределённые силы притяжения листовой заготовки

Рис. 2: внешний радиус рабочей зоны – $R_w = R_2 = 0,129$ м; среднее значение распределённой силы притяжения – $\bar{P}_{attr} = 3,6$ Мпа; интегральная сила притяжения – $F_{attr}^{full} = 264000$ Н, в зоне с минимумом распределённой силы притяжения, равным её среднему, где $r_1 \approx 6R_1$; $r_2 = R_w$, 90 %-й показатель – $F_{attr}^{90\%} = 240000$ Н.

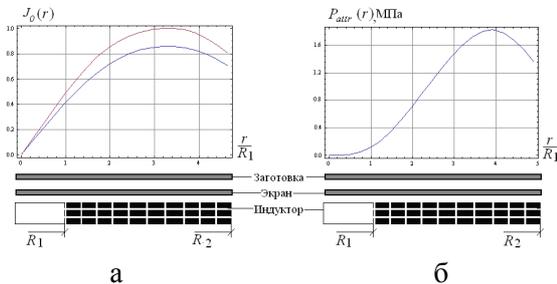


Рис. 3. Радиальные распределения токов и сил в ИСПЭ, возбуждаемой внешним соленоидом с двухслойной обмоткой ($w_r=3$), число витков по радиусу – $w_r=10$: а – индуцированные токи в относительных величинах; б – распределённые силы притяжения листовой заготовки

Рис. 3: внешний радиус рабочей зоны – $R_w = R_2 = 0,049$ м; среднее значение распределённой силы притяжения – $\bar{P}_{attr} = 0,96$ МПа; интегральная сила притяжения – $F_{attr}^{full} = 2525$ Н, в зоне с минимумом распределённой силы притяжения, равным её среднему, где $r_1 \approx 2,4R_1$; $r_2 = R_w$, 90%-й показатель – $F_{attr}^{90\%} = 9120$ Н.

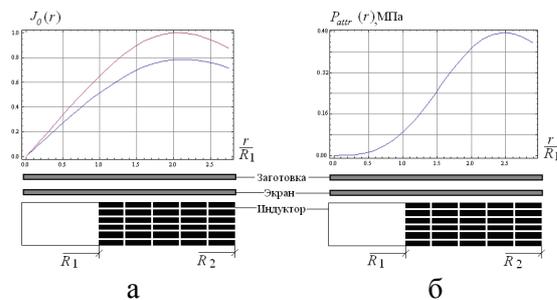


Рис. 4. Радиальные распределения токов и сил в ИСПЭ, возбуждаемой внешним соленоидом с двухслойной обмоткой ($w_f=6$), число витков по радиусу – $w_r=5$: а – индуцированные токи в относительных величинах; б – распределённые силы притяжения листовой заготовки

Рис. 4: внешний радиус рабочей зоны – $R_w = R_2 = 0,029$ м; среднее значение распределённой силы притяжения – $\bar{P}_{attr} = 0,224$ МПа; сила притяжения – $F_{attr}^{full} = 868$ Н, в зоне с минимумом распределённой силы притяжения, равным её среднему, где $r_1 \approx 1,4R_1$; $r_2 = R_w$, 90 %-й показатель – $F_{attr}^{90\%} = 9120$ Н.

Выводы

При уменьшении внешнего радиуса обмотки возбуждающего соленоида (соответственно размера рабочей зоны почти в ~ 4 раза), за счёт роста числа витков по вертикали и снижения их радиального количества, разница между величинами токов, индуцированных в экране и заготовке, растёт от 10 % до 20 %.

Максимум распределённой силы притяжения концентрируется на окружности $\sim (0,7-0,8) \cdot R_2$.

В диапазоне $R_2 = 0,129-0,029$ м средние значения распределённых сил притяжения заключены в интервале – $\bar{P}_{attr} = 2,48-0,224$ МПа.

Очевидно, что уменьшение размера рабочей зоны для неизменности распределённых сил притяжения требует увеличения тока в индукторе.

Литература

1. Батыгин Ю.В. Цилиндрическая индукционная индукторная система для притяжения тонкостенных листовых металлов / Ю.В. Батыгин, А.Ю. Бондаренко, Е.А. Чаплыгин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – №11 (47). – С. 109–117.
2. Пат. 70734 України, В21 Д 26/14. Спосіб магнітно-імпульсного притягання металевих об'єктів двовитковою круговою індукторною системою з тонким екраном / Батигін Ю. В., Гнатів А. В., Чаплигін Є. О., Гопко А. В., Щиголева С. О., Дробінін О. М; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дор. ун-т. – № u2011 14018 ; заявл. 28.11.2011; опубл. 25.06.2012, Бюл. № 12.
3. Пат. України №77579, В21 Д 26/14. Спосіб магнітно-імпульсного притягання металевих об'єктів заготовок одновитковим круговим індуктором, розташованим над допоміжним екраном / Батигін Ю.В., Гнатів А.В., Чаплигін Є.О., Трунова І.С., Гопко А.В., Сабокар О.С., заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дор. ун-т. – № u 2012 07542, заявл. 20.06.2012; опубл. 25.02.2013, Бюл. №4.
4. Batygin Yuri V. Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – Fundamentals and perspective applications / Yuri V. Batygin, Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov // Journal of Materials Processing Technology. – 2013. – № 213 (3). – P. 444–452.
5. Батыгин Ю.В. Физические основы возможных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов / Ю.В. Батыгин, В.И. Лавинский, Л.Т. Хищенко // Електротехніка і електромеханіка. – 2004. – № 2. – С. 80–84.
6. Direction Change of the Force Action upon Conductor under Frequency Variation of the Acting magnetic Field : proceedings of the 1-st International Conference [«High Speed Metal Forming»], (Dortmund, March 31/April 1, 2004) / Yu. V. Batygin,

- V. I. Lavinsky, L. T. Khimenko. – Dortmund, Germany. 2004. – P. 157–160.
7. Пат. України №75676, Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок / Батигін Ю.В., Лавинський В.І., Хавін В.Л., Хищенко Л.Т., заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № 2004010512 07542; заявл. 23.01.2004; опубл. 15.05.2006, Бюл. №5.
 8. Туренко А. Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий: монография. Том 3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями / А.Н. Туренко, Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов. – Х.: ХНАДУ, 2009. – 240 с.
 9. International Patent Application WO2008/0163661A1 Dent Removing Method and Device / Meichtry R., Kouba I. 2008.
 10. Батыгин Ю.В. Магнитно-импульсное притяжение/отталкивание тонкостенных листовых ферромагнетиков / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов // Электричество. – 2012. – № 8. – С. 58–65.
 11. Батыгин Ю. В. Расчёт полей и токов в индукторной системе с притягивающим экраном и дополнительным витком как инструмента рихтовки / Ю.В. Батыгин, Е.А. Чаплыгин, С.А. Шиндерук // Электротехника и электромеханика. – 2015. – № 1. – С. 57–62.
 12. Барбашова М. В. Анализ электромагнитных процессов нагрева немагнитных металлов полем плоского кругового соленоида./ М.В. Барбашова, О.С. Сабокар, А.С. Сябрук // Автомобіль і електроніка. Сучасні технології. – 2015. – № 8. – С. 176–181.
- duktornoyu systemoyu z tonkym ekranom* [Method pulse-magnetic attraction of metal objects by double-turn circular inductor system with thin screen] Pat. Ukrayiny №u 70734, V21 D 26/14. № u2011 14018; zayavl. 28.11.2011; opubl. 25.06.2012, Byul. № 12.
3. Batyhin Yu.V., Hnatov A.V., Chaplyhin Ye.O., Trunova I.S., Hopko A.V., Sabokar O.S. *Sposib mahnitno-impul'snoho prytyahannya metalevykh ob'yektiv zahotivok odnovytkovym kruhovym induktorom, roztashovanyam nad dopomizhnym ekranom* [Method pulse-magnetic attraction of metal objects by single-turn circular workpieces inductor located above the auxiliary screen] Pat. Ukrayiny № 77579, V21 D 26/14, № u 2012 07542 zayavl. 20.06.2012; opubl. 25.02.2013. Byul. № 4.
 4. Batygin Yuri V., Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – Fundamentals and perspective applications, Journal of Materials Processing Technology, Elsevier, 2013, no. 213 (3), pp. 444–452.
 5. Batygin Yu.V., Lavinskij V.I., Himenko L.T. *Fizicheskie osnovy vozmozhnyh napravlenij razvitiya magnitno-impul'snoj obrabotki tonkostennykh metallov* [Physical foundations of possible directions for the development of magnetic-pulse processing of thin-walled metals] Elektrotehnika i elektromekhanika, 2004, no. 2, pp. 80–84.
 6. Batygin Yu. V., Lavinsky V. I., Khimenko L. T. Direction Change of the Force Action upon Conductor under Frequency Variation of the Acting magnetic Field: proceedings of the 1-st International Conference [«High Speed Metal Forming»], (Dortmund, March 31/April 1, 2004), Dortmund, Germany, 2004, pp. 157–160.
 7. Batygin Yu.V., Lavins'ky V.I., Khavin V.L., Khymenko L.T. *Sposib mahnitno-impul'snoyi obrobky tonkostinnykh metalevykh zahotivok* [The method of magnetic pulse processing thin metal workpieces] Pat. Ukrayiny № 75676, № 2004010512 07542 zayavl. 23.01.2004; opubl. 15.05.2006. Byul. № 5.
 8. Turenko A. N., Batygin Yu. V., Gnatov A. V. *Impul'snye magnitnye polya dlya progressivnykh tekhnologii. Tom 3. Teoriya i eksperiment prityazheniya tonkostennykh metallov impul'snymi magnitnymi polyami* [Pulsed magnetic fields for progressive technologies. Volume 3. Theory and exper-

References

1. Batygin Yu. V., Bondarenko A. Yu., Chaplygin E. A., *Cilindricheskaja indukcionnaja induktornaja sistema dlja prityazheniya tonkostennykh listovykh metallov* [Cylindrical induction inductor system for attraction of thin-walled sheet metals], Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija, 2007, no. 11 (47), pp. 109–117.
2. Bathyhin Yu.V., Hnatov A.V., Chaplyhin Ye.O., Hopko A.V., Shchyholeva S.O., Drobinin O.M. *Sposib mahnitno-impul'snoho prytyahannya metalevykh ob'yektiv dvovytkovoyu kruhovoyu in-*

- iment attraction of thin-walled metal pulsed magnetic fields], Khar'kov, KhNADU Publ., 2009, 240 p.
9. International Patent Application WO2008/0163661A1 Dent Removing Method and Device / Meichtry R., Kouba I. 2008.
 10. Batygin Yu.V., Gnatov A.V. *Magnitno-impul'snoe prityazhenie /ottalkivanie tonkostennykh listovykh ferromagnetikov* [Magneto-impulse attraction / repulsion of thin-walled sheet ferromagnets], *Elektrichestvo*, 2012, no. 8, pp. 58–65.
 11. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Shinderuk S.A. *Raschyot polej i tokov v induktornoj sisteme s prityagivayushchim ehkranom i dopolnitel'nym vitkom kak instrumenta rihtovki* [Calculation of fields and currents in inductor system with attractive screen and additional turn as straightening tool]. *Elektrotehnika i ehlektromekhanika*, 2015, no. 1, pp. 57–62.
 12. Barbashova M.V., Sabokar' O.S., Syabruk A.S. *Analiz ehlektromagnitnykh processov nagreva nemagnitnykh metallov polem ploskogo krugovogo solenoid* [Analysis of electromagnetic processes heating of nonmagnetic metals by the field of plane circular solenoid]. *Avtomobil' i elektronika. Suchasni tekhnologij*, 2015, no. 8, pp. 176–181.

Рецензент: А.В. Гнатов, профессор, д.т.н., ХНАДУ.
